JUNIO 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

FISICA
Láseres que miden fenómenos ultrabreves

ECOLOGIA
Comienza a recuperarse el mar de Aral

MATERIALES
Propiedades exóticas del grafeno

MEDICINA
¿Podremos regenerar extremidades en humanos?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

EL COLOR DE LAS

PLANTAS EXTRATERRESTRES

Los vegetales de otros mundos podrían ser rojos, azules o negros

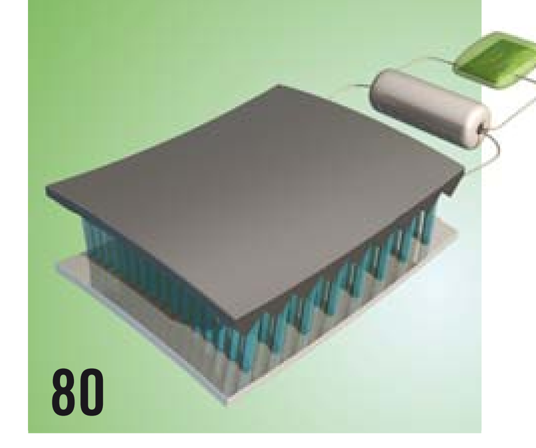


SUMARIO

Junio de 2008/Número 381



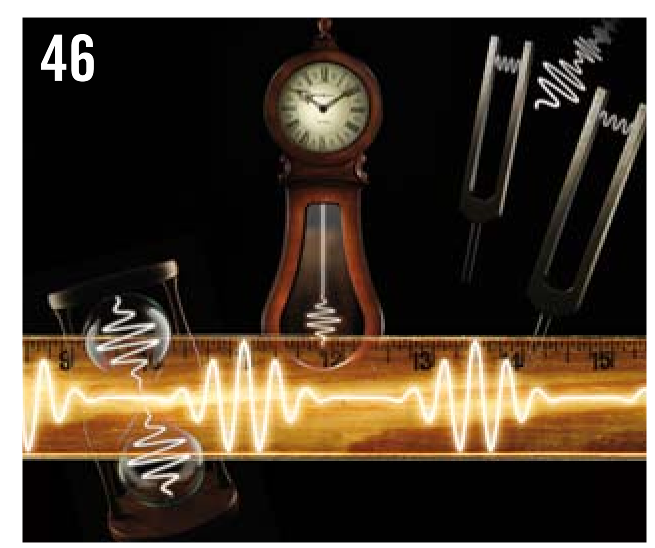
Matteo Ricci llevó el teorema de Pitágoras a China.



El entorno podría alimentar a las nanomáquinas.



La reconstrucción de un brazo exigiría la regeneración de varios tejidos.



Trenes de impulsos luminosos que tienen un espectro con forma de peine.

ARTICULOS

ASTROBIOLOGIA

14 El color de las plantas extraterrestres

Nancy Y. Kiang

En otros mundos, los vegetales podrían ser rojos, azules o negros.

MEDICINA

24 Regeneración de las extremidades

Ken Muneoka, Manjong Han y David M. Gardiner

Las salamandras muestran una asombrosa capacidad para regenerar miembros amputados. El estudio de ese anfibio abre nuevas vías para la reconstrucción de miembros y tejidos del cuerpo humano.

HISTORIA

32 Matteo Ricci, el misionero sabio

Dagmar Schäfer

Matteo Ricci y otros jesuitas veían en la ciencia occidental un argumento para la conversión de China. Esta estrategia fracasó, no sin consecuencias en los siglos posteriores.

OPTICA

46 Reglas de luz

Steven Cundiff, Jun Ye y John Hall

Gracias a un revolucionario tipo de luz láser, el peine de frecuencias ópticas, se construye una clase más precisa de relojes atómicos, entre muchas otras aplicaciones.

MATERIALES

54 Grafeno

André K. Geim y Philip Kim

El grafeno, forma de carbono de reciente obtención, proporciona un rico sustrato a la física fundamental y promete múltiples aplicaciones.

ECOLOGIA

62 Recuperación del mar de Aral

Philip Micklin y Nikolay V. Aladin

Vaciar de manera imprudente el cuarto lago mayor del mundo para regar campos de labor lo convirtió en un desierto seco y tóxico. Se está recuperando ahora su parte septentrional.





El puerto de Aralsk muestra vertidos de basura y plaguicidas.



En los mundos que giran en torno a estrellas poco luminosas las plantas se verían de color negro.

Láminas de carbono de un solo átomo de espesor constituyen un nuevo material.

FISICA

70 Plasmas fríos

Francisco José Gordillo Vázquez

Los plasmas fríos se encuentran lejos del equilibrio térmico: los electrones, iones y átomos neutros que los constituyen tienen temperaturas diferentes. Esto confiere a los plasmas fríos unas propiedades de gran interés aplicado.

NANOTECNIA

80 Nanotecnia autoalimentada

Zhong Lin Wang

Las máquinas nanométricas necesitan unas fuentes de alimentación aún más diminutas.

SECCIONES

3 CARTAS AL DIRECTOR

4 HACE...
50, 100 y 150 años.

5 PUESTA AL DIA
Nanotubos sin toxicidad... En busca de nueva vida... *Así* te mata el trabajo... Luz verde eólica.

6 APUNTES
Biología... Geología... Astronomía... Percepción.

8 CIENCIA Y SOCIEDAD
Acido que cae del cielo... Sin rayos de Virgo... Aleaciones de titanio... Hongos tóxicos en las uvas.

42 DE CERCA
Fideos de mar, por *José Rico*

44 PERFILES
Chris Wiggins: en el filo del código de la vida, por *Thania Benios*

86 TALLER Y LABORATORIO
La máquina de Draper, por *Marc Boada Ferrer*

89 DESARROLLO SOSTENIBLE
Claves para proteger el clima, por *Jeffrey D. Sachs*

90 JUEGOS MATEMATICOS
El problema de los tres dioses, por *Juan M.R. Parrondo*

92 IDEAS APLICADAS
Escáneres corporales, por *Stuart F. Brown*

94 LIBROS
Tierra

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Recoletos, 11 3.º D
28001 Madrid
Tel. y fax 915 759 278
Móvil 649 933 834

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Manuel González Mañas: *El color de las plantas extraterrestres*; Luis Bou: *Regeneración de las extremidades* y *Puesta al día*; Francesc Castelló: *Matteo Ricci, el misionero sabio*; A. Garcimartín: *Perfiles*; Ramón Pascual: *Reglas de luz*; Joandomènec Ros: *Recuperación del mar de Aral*; J. Vilardell: *Nanotecnia autoalimentada*, *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Kenn Brown (*concepción artística*), Jean-Francois Podevin (*ilustración*)

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



El Sol y la energía

En el artículo "Un proyecto solar", de Ken Zweibel, James Mason y Vasilis Fthenakis (marzo 2008), se defiende la conversión en parques fotovoltaicos de 80.000 kilómetros cuadrados de desierto. Hay una solución mejor: utilizar los tejados. Aunque así no se aproveche la concentración de radiaciones solares propia del Suroeste y sea menor el rendimiento, la generación de energía podrá distribuirse en diferentes zonas horarias y condiciones climáticas sin tener que sacrificar más tierras.

Mathieu Federspiel
por correo electrónico

¿Se ha pensado en los efectos de instalar 80.000 kilómetros cuadrados de un material de escaso poder reflectante? Los paneles solares tienen, por su diseño, un albedo (coeficiente reflector de energía) mucho menor que la mayoría del terreno llano del Suroeste. ¿Cómo afectaría su mayor absorción del calor al medio circundante?

Talon Swanson
Seattle

RESPUESTA DE LOS AUTORES
Respecto a la primera carta, es corriente y justificada la crítica de que nuestro proyecto solar no presta atención suficiente a los sistemas de energía distribuida, como los fotovoltaicos y los de calefacción solar sobre edificios. Si se abarataran los sistemas residenciales y hubiera almacenamiento local, las instalaciones dispersas podrían tener más relevancia que la descrita en nuestro artículo.

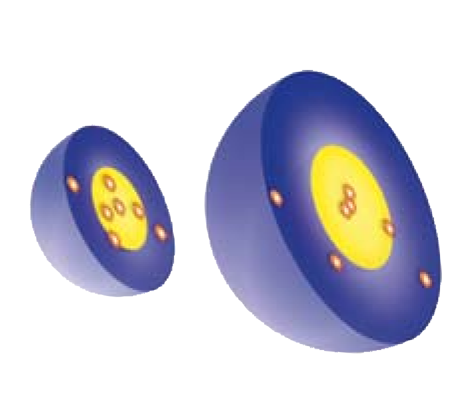
En cuanto a la segunda carta, los cambios de albedo originarían diferencias locales en la temperatura y las corrientes de aire. Aunque todavía carecemos de estudios sobre la repercusión en grandes parques fotovoltaicos, las observaciones y modelos a escala mundial permiten algunas declaraciones. Tom Hansen, director de la planta fotovoltaica de Tucson Electric Power Company en Springerville, ha detectado un incremento de entre un grado y grado y medio en el centro del parque fotovoltaico y la formación de un remolino de aire desde la periferia hacia el centro. Una superficie de 50.000 kilómetros cuadrados recibiría diariamente una energía próxima a 3×10^{14} *watt-hora. Un 20 por ciento de diferencia de albedo entre el desierto y los paneles fotovoltaicos crearía un exceso neto de* 6×10^{13} *watt-hora al día. En las grandes ciudades del Suroeste se han producido variaciones de albedo semejantes sin efectos perceptibles. También se ha de considerar que el calentamiento debido al albedo sería contrarrestado, a nivel nacional, por la supresión del calentamiento que, si no, crearían las centrales termoeléctricas. Greg Nemet de la Universidad de Wisconsin en Madison, ha estudiado, teniendo en cuenta el efecto del albedo, el forzamiento radiativo neto que se produciría si el 50 por ciento de la energía mundial lo suministrasen instalaciones fotovoltaicas. Su conclusión es que sería una de las soluciones más eficaces contra el calentamiento global antropogénico.*

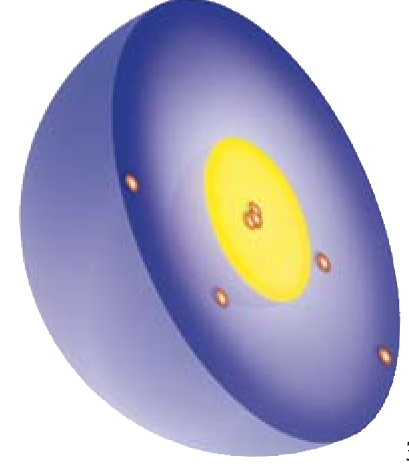
Sin embargo, la posibilidad de efectos locales merece ser estudiada con mayor detenimiento. Quizá deberían crearse zonas amortiguadoras, no solares, en torno a los grandes sistemas fotovoltaicos. En prevención del calentamiento local, estos sistemas no se construirían cerca de poblaciones importantes.

Huellas del pasado en el universo futuro

Según los autores del artículo de mayo "El fin de la cosmología", en un futuro lejano será muy difícil, si no prácticamente imposible, deducir cuál era la composición química del universo (abundancia de helio, deuterio, etc.) tras los primeros minutos de la gran explosión. Sin embargo, la mayoría de los objetos subestelares no tienen una energía interior suficiente para producir reacciones nucleares y procesar la materia de la que están formados. Es decir, estos objetos preservan el contenido químico de la nube de la que nacieron (quizá con pequeñas modificaciones). Y según lo que la teoría actual de los objetos subestelares nos enseña, estos cuerpos "no se autodestruyen" (como es el caso de las estrellas, como el Sol, que pierden sus capas exteriores, o de las estrellas masivas que explotan como supernovas), sino que sobreviven; sólo van enfriándose cada vez más y perdiendo brillo. Las enanas marrones y los planetas aislados son las reservas del material original con el que nacieron. En un futuro muy lejano, si es que tal y como comentan los autores no quedan nubes de gas intergaláctico detectables, el estudio de los objetos subestelares más viejos y con masas inferiores a 13 veces la masa de Júpiter permitirá inferir las cantidades relativas de los elementos ligeros creadas en los principios del universo.

M.ª Rosa Zapatero
Instituto de Astrofísica de Canarias

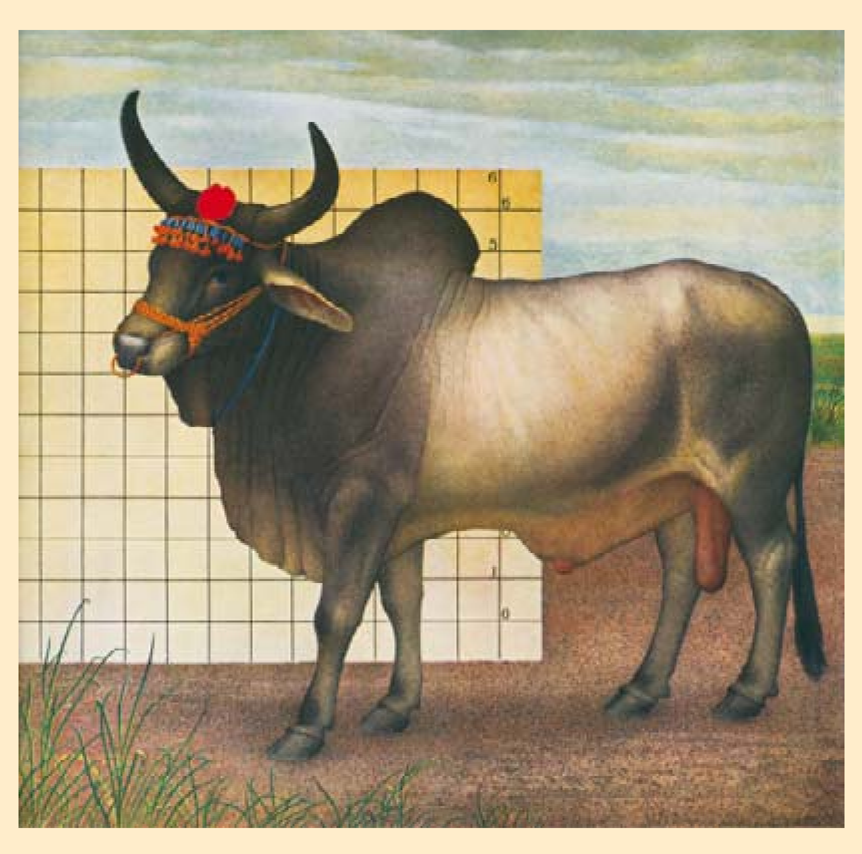




Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Un país pasivo. «Entre nuestros jóvenes, una encuesta tras otra confirman estadísticamente el fenómeno de la vida norteamericana que David Riesman, en su libro *La muchedumbre solitaria*, llamó orientación de los otros, una extremada sensibilidad a la opinión de los demás y un consiguiente conformismo. Parece que el país padece un síndrome caracterizado por una atrofia de la voluntad, una hipertrofia del ego y una distrofia de la musculatura intelectual. Una imagen más bien ingrata que se deduce de la masa de información sobre las actitudes de los jóvenes. Más de la mitad creen que a la Agencia Federal de Investigación debe permitírsele intervenir teléfonos a su arbitrio y a la policía usar el tercer grado, es decir, que quienes se nieguen a testificar contra sí mismos deben ser obligados a ello.»



Toro de raza Kankrej, variedad de labor del ganado cebú del interior de la India, 1958.

Recursos bovinos. «El ganado vacuno ocupa el primer lugar entre los animales útiles al hombre. Es cierto que hay más corderos y que en el aprecio del hombre las superan caballos y perros, pero ningún otro animal doméstico presta tal variedad de servicios al bienestar humano como las vacas. Para los consumidores norteamericanos y europeos, el ganado vacuno representa carne, leche, mantequilla, queso y cuero; producen extractos hormonales y vitamínicos, harina de hueso para piensos y abonos, y concentrados proteínicos para alimento de ganado. Sin embargo, más de un tercio de los 800 millones de cabezas de vacuno que hay en el mundo se dedican, sobre todo, a la generación de energía bruta para faenas de arado, acarreo y molienda.»

...cien años

El cuidado de los leprosos. «Durante los últimos siglos, el cuidado de los leprosos ha recibido una atención notable en las islas Filipinas. Si la segregación de los leprosos erradicase la enfermedad, nos hallaríamos ante una buena inversión. Pero en las Filipinas, el registro médico no es en absoluto concluyente acerca de la eficacia de la segregación. Con todo, en la pequeña isla de Culion se ha inaugurado una colonia en donde se han concentrado leprosos. Se está considerando declarar leprosos sólo a las personas en cuyos tejidos se hallen, mediante examen microscópico, bacilos de lepra. Es digno de mención que mientras se estaba reuniendo a los leprosos, se observó, tras un examen cuidadoso, que sólo la mitad de quienes habían sido registrados como tales lo eran en realidad.»

Escriben los hermanos Wright. «La primavera de 1908 nos halló con algunos contratos [del gobierno] en la mano, cuyas condiciones requerían unas prestaciones a las que no se ajustaban nuestros vuelos de 1905. El mejor vuelo de aquel año, del 5 de octubre, cubrió una distancia de algo más de 38 kilómetros, a una velocidad de unos 60 kilómetros por hora, con una sola persona a bordo. Los contratos pedían una máquina que volara a 65 kilómetros por hora, capaz de transportar dos hombres y una reserva de combustible para cubrir distancias de 200 kilómetros. Los últimos experimentos se acometieron con vistas a ensayar nuestro aparato bajo esas premisas y para familiarizarnos con las palancas de mando que habíamos instalado en los últimos modelos.»

...ciento cincuenta años

Tintes de anilina. «Hace cuatro años, el eminente químico inglés F. Grace Culvert afirmaba que 'dentro de poco, un tinte muy valioso se preparará a partir de carbón'. Hace pocas semanas mostró ante la Sociedad de Artes de Londres un hermoso colorante azul purpúreo que rivaliza con la urchilla [un tinte vegetal] y posee la ventaja de resistir a la luz. Esos colorantes, pues son numerosos, han sido preparados a partir de los álcalis del alquitrán de hulla por los señores William Henry Parkin y Arthur H. Church, dos descubridores en auge, que les han dado los nombres de nitroso-fenilina y nitroso-naftilina. Se han ensayado en seda y no destiñen.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. 198, N.º 6; JUNIO DE 1958

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Nanotubos sin toxicidad

Las nanopartículas podrían encargarse de tareas biomédicas muy prometedoras, como el traslado de fármacos hasta células enfermas o la detección de anomalías genéticas [*véase* "Nanotécnica en medicina", en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; noviembre de 2001]. Pero existe el temor de que esos diminutos útiles pudieran envenenar nuestro organismo. Un equipo de la Universidad de Stanford ha realizado un experimento que pudiera aliviar tales recelos. Inyectaron en ratones unos 20 microgramos de nanotubos de carbono monocapa; los roedores no mostraron indicios de efectos negativos ni de acumulaciones mortales de nanotubos en sus órganos. De hecho, al cabo de tres meses, los ratones expulsaron los túbulos por vía fecal y urinaria. Los hallazgos se publicaron en el número de 5 de febrero de *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.



En busca de nueva vida

La construcción de organismos artificiales constituye una meta esencial de la biología sintética, pues tales criaturas se crearían "a la medida" para realizar un gran número de funciones útiles. Científicos del Instituto J. Craig Venter, de Rockville, en Maryland, comunicaron en enero que habían construido los 582.970 pares de bases que constituyen el genoma de la bacteria *Mycoplasma genitalium*. Sólo les falta ahora insertar en una célula el genoma manufacturado y ver si ésta cobra vida; la perspectiva es que lo logren en el plazo de un año, dado su éxito anterior con el intercambio de genomas entre bacterias. Para demostrar que el genoma es artificial, añadieron marcas (secuencias insertadas o sustituidas) a ciertos aminoácidos, cuyas iniciales deletrean los nombres del instituto y de los investigadores.



Así te mata el trabajo

Un estudio epidemiológico efectuado hace unos 35 años con 18.000 funcionarios británicos, todos varones, hizo ver que los empleados de menor rango presentaban las mayores tasas de fallecimiento prematuro. Los resultados de la investigación, a la que se denominó Estudio Whitehall, constituyeron una sorpresa, porque resultó que la responsabilidad inherente al cargo, el volumen de trabajo del puesto, apenas tenían relación con el nivel de estrés. Sí la tenía, en cambio, el grado de control sobre el trabajo.

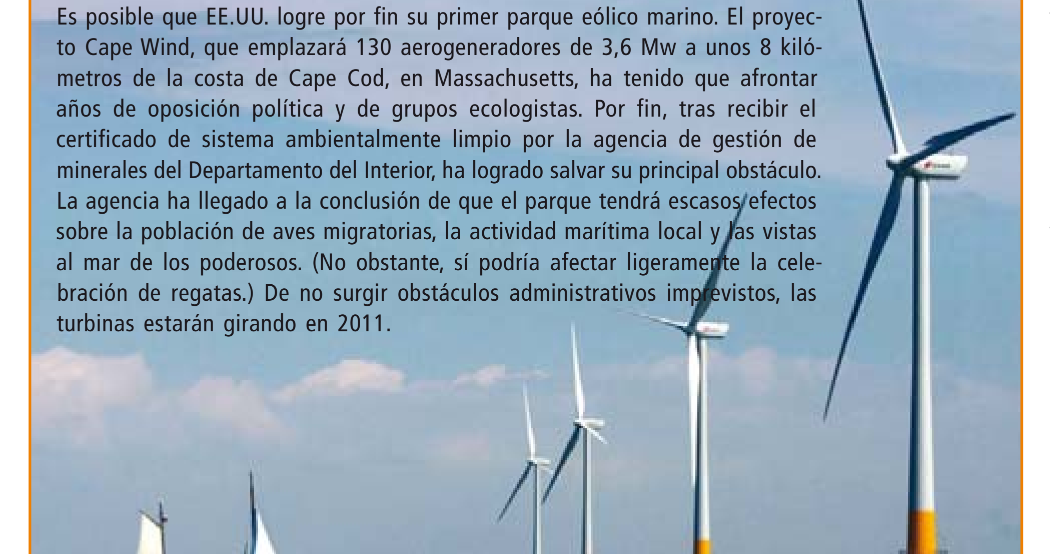
Una segunda parte, el Estudio Whitehall II, iniciado en los años ochenta del siglo pasado, ha revelado nuevos detalles de los mecanismos que subyacen bajo los vínculos, ahora firmemente establecidos, entre el control limitado de las tareas, el estrés y las enfermedades cardiovasculares. Han encontrado que nada menos que la tercera parte del riesgo cardíaco de un individuo se debe a conductas insanas que entrañan estrés (malnutrición, tabaquismo y sedentarismo) y a trastornos relacionados con el estilo de vida (hipertensión e hiperglucemia). Las otras dos terceras partes eran atribuibles al desgaste biológico que comporta vivir en constante situación de "lucha o huída".

Los trabajadores con mayor índice de estrés presentaban valores mínimos en las tasas de variabilidad del ritmo cardíaco, una medida de los ritmos cardíacos controlados por el sistema nervioso autónomo. La exposición crónica a hormonas de estrés debilita la capacidad del corazón para responder a demandas variables; una baja variabilidad del ritmo cardíaco se asocia con un mayor riesgo de ataque cardíaco y una menor tasa de supervivencia posterior. Los hallazgos se publicaron en el *European Heart Journal*.

—Christine Soares

Luz verde eólica

Es posible que EE.UU. logre por fin su primer parque eólico marino. El proyecto Cape Wind, que emplazará 130 aerogeneradores de 3,6 Mw a unos 8 kilómetros de la costa de Cape Cod, en Massachusetts, ha tenido que afrontar años de oposición política y de grupos ecologistas. Por fin, tras recibir el certificado de sistema ambientalmente limpio por la agencia de gestión de minerales del Departamento del Interior, ha logrado salvar su principal obstáculo. La agencia ha llegado a la conclusión de que el parque tendrá escasos efectos sobre la población de aves migratorias, la actividad marítima local y las vistas al mar de los poderosos. (No obstante, sí podría afectar ligeramente la celebración de regatas.) De no surgir obstáculos administrativos imprevistos, las turbinas estarán girando en 2011.



Tal vez algún día se alcen frente a las costas de Massachusetts parques eólicos marinos como el de la foto, que opera en la costa sudoriental de Kent, Inglaterra.

LAGUNA DESIGN/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*nanotubo*); DAVID BEBBER, POOL *AP Photo* (*molinos de viento*); ANDERSEN ROSS *Getty Images* (*hombre en el escritorio*)

BIOLOGIA

La doble hélice se empareja



Sin ninguna otra molécula que las guíe, las hélices dobles de ADN con secuencias idénticas pueden reconocerse una a otra a distancia, e incluso acercarse mutuamente. Que las bases de ADN se atraen, no es ninguna sorpresa, porque los pares de bases son complementarias: la adenina se enlaza con la timina, la citosina con la guanina. Sin embargo, cuando forman una doble hélice, estas bases están ocultas, escondidas detrás de cadenas con alta carga eléctrica de azúcares y fosfatos.

A pesar de ello, un grupo del Colegio Imperial de Londres y del Instituto Nacional Estadounidense de Salud Infantil y Desarrollo Humano ha descubierto que las dobles cadenas de ADN con las mismas secuencias tenían el doble de posibilidades de encontrarse que el ADN con secuencias diferentes en distancias de hasta tres nanómetros (una doble cadena de ADN tiene unos dos nanómetros de anchura).

Los investigadores piensan que las bases de cada ADN podrían hacer que una doble hélice gire en una dirección o en la otra. Aunque cada grupo cargado eléctricamente de azúcares y fosfatos dentro del ADN repele a los presentes en otras dobles hélices de ADN, las moléculas idénticas describen curvas similares. Por lo tanto, las partes superiores e inferiores de hélices idénticas se ajustan mutuamente mejor que con las de otras hélices de ADN, haciendo que sea más fácil que lo semejante se agrupe con lo semejante.

Esta atracción podría ayudar a que los fragmentos de genes se alineasen adecuadamente antes de mezclarse, colaborando así con la reordenación del ADN que se produce durante la reproducción. También podría evitar algunos de los errores genéticos que subyacen bajo el cáncer y el envejecimiento.

—Charles Q. Choi

GEOLOGIA

Diálogo en marcha

Los nuevos lenguajes se desgajan de los antiguos con un estallido inicial de modificaciones del vocabulario, antes de serenarse e ir cambiando gradualmente con el tiempo, según afirma un grupo de investigadores británicos. Este grupo se centró en tres grandes familias lingüísticas: bantú (suahili y zulú, por ejemplo), indoeuropea y austronesia (tagalo, lengua seediq). Entre un 10 y un 33 por ciento de la divergencia entre los lenguajes provenía de cambios clave en el vocabulario en el momento de la división de los lenguajes.

Este abrupto proceso ocurre cuando un grupo social intenta forjar una identidad separada, según los investigadores, que citan como ejemplos la aparición repentina del inglés americano cuando Noah Webster publicó su diccionario en 1828 y, más recientemente, el desarrollo del inglés afroamericano.

—Nikhil Swaminathan

EVOLUCION

Sexo que abre ojos

Rasgos anatómicos que tardaron miles de años en evolucionar pueden revertir en una sola generación. En concreto, las relaciones sexuales entre peces cavernícolas ciegos, orquestadas de modo conveniente, pueden engendrar progenie con visión. La forma albina, ciega y cavernícola de tetra mexicano (*Astyanax mexicanus*) evolucionó a partir de ancestros que moraban cerca de la superficie, pero su visión se fue esfumando cuando tuvieron que descender hacia aguas profundas, de oscuridad completa, hace aproximadamente un millón de años. Estos peces cavernícolas, que medran en cuevas de agua dulce del noreste de México, pueden alcanzar una longitud de unos 12 centímetros; la piel, al crecer, les recubre los ojos, carentes ahora de utilidad.

Se ha descubierto que la pérdida de la vista de los peces cavernícolas evolucionó al menos tres veces, de forma independiente; en cada caso, la ceguera fue resultado de mutaciones en más de un sitio génico. Algunas, cuando menos, de las mutaciones responsables de la pérdida de visión fueron diferentes entre las 29 poblaciones de peces cavernícolas cuya existencia se conoce. Esta diversidad en las mutaciones sugería que la crianza conjunta de diferentes linajes de peces cavernícolas podría producir descendencia con visión, pues las deficiencias genéticas de un grupo podrían quedar compensadas por genes operativos de otro.

Richard Borowsky, biólogo evolucionista de la Universidad de Nueva York, observó que en las progenies híbridas correspondientes a poblaciones de diferentes cuevas existían en todos los casos algunos individuos, dotados de ojos menores que lo normal aunque funcionales, capaces de seguir con la mirada una serie de franjas móviles. Cuanto más separadas se encontrasen las cuevas donde moraban los padres ciegos, mayor era la probabilidad de que su progenie tuviera vista.



Persianas bajadas: Lo que queda de los ojos de un pez cavernícola ciego está recubierto de piel. Lo vemos aquí al lado de dos parientes con visión.

Este patrón viene a respaldar la idea de que los linajes separados por grandes distancias están más lejanamente emparentados y tienen, por consiguiente, una menor superposición de genes responsables de su ceguera. La identificación de las mutaciones específicas subyacentes a la pérdida de visión de los peces podría ayudar a entender mejor el desarrollo del ojo humano y su ceguera.

—Charles Q. Choi

PAUL MORRELL *Getty Images (arriba)*; CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD DE NUEVA YORK *(abajo)*

ASTRONOMIA

Mercurio a la vista

La superficie llena de cicatrices de Mercurio tiene de lejos cierta semejanza con la de la Luna. De cerca no se parecen en absoluto. La sonda espacial *Messenger*, de la NASA, transmitió estas y otras imágenes durante su primer sobrevuelo del calcinado planeta el 14 de enero. No habían observado tantos detalles desde que la sonda *Mariner 10* pasó rauda junto al planeta hace 33 años. Gracias a mejores aparatos y ángulos de iluminación diferentes, *Messenger* ha conseguido información nueva.



Equipada con once filtros de colores, *Messenger* puede ver más allá de lo que podría captarse a simple vista. En la fotografía de colores ficticios creada a partir de tres imágenes con filtros de color distintos que se muestra aquí (*arriba*), los cráteres jóvenes, cuya edad no supera los 500 millones de años, aparecen teñidos de un leve tono azulado.



La sonda ha encontrado numerosas escarpaduras o fallas que se extienden a lo largo de cientos de kilómetros. Una de ellas sigue verticalmente el borde derecho de la imagen de abajo, que cubre una extensión horizontal de unos 200 kilómetros. Las escarpaduras se formaron, probablemente, cuando se enfrió el interior de Mercurio, el planeta se encogió y su superficie se agrietó.

La sonda *Messenger* estableció también que la gigantesca depresión geográfica Caloris, uno de los mayores cráteres del sistema solar creados por un impacto, tiene una amplitud de 1500 kilómetros, casi un tercio del diámetro del planeta, 200 kilómetros más de lo que se creía. Dentro de la depresión, e invisible para la sonda *Mariner 10*, se encuentra una estructura a la que denominan "la araña", compuesta por fosas radiales que marcan, probablemente, las zonas en las que el suelo de la depresión se quebró tras su formación.

La sonda volverá a visitar Mercurio el próximo mes de octubre y una vez más en septiembre del año 2009, antes de entrar en órbita alrededor del planeta en marzo de 2011. Seguirá tomando fotografías, cartografiando mediante técnicas láser la topografía y midiendo la magnetosfera del planeta.

—*Philip Yam*



DATOS

A más sueño, menos kilos

La falta de sueño contribuye a un mayor riesgo de obesidad, avala la investigación reciente. Al abordar la obesidad infantil, un grupo de la Universidad Johns Hopkins llevó a cabo un metaanálisis de 11 estudios que estudiaban la duración del sueño de los niños y su masa corporal. Confirmaron que no dormir lo suficiente perturbaba los niveles hormonales, con el consiguiente incremento excesivo de peso.

Tiempo mínimo de sueño recomendado para niños:

Con menos de 5 años: 11 horas

Entre 5-10 años: 10 horas

Con más de 10 años: 9 horas

Aumento de la probabilidad de sobrepeso si, con respecto al número mínimo de horas de sueño recomendadas, al niño le falta:

1 hora: 43 por ciento

1-2 horas: 60 por ciento

Más de 2 horas: 92 por ciento

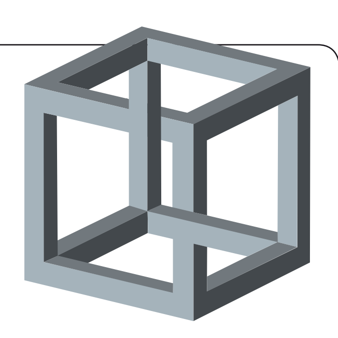
FUENTE: Obesity, *febrero de 2008*

PERCEPCION

Ojo con las ilusiones

Las imágenes ambiguas parecen cambiar intermitentemente entre dos alternativas, como si el cerebro no pudiera decidirse sobre su percepción. El cubo de Necker unas veces parece estar metiéndose en la página y otras salirse de ella. En un experimento con seis voluntarios y distintos tipos de estímulos ambiguos, tanto visuales como sonoros, Christof Koch y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de California, encontraron que las pupilas se dilataban más o menos en el momento en el que cambiaba la percepción. La amplitud de la dilatación momentánea, que podía llegar a ser de un milímetro (mientras que las pupilas sólo miden unos dos milímetros bajo una luz brillante), guardaba relación con el tiempo que duraba dicha percepción en particular. Debido a que la noradrenalina, un neurotransmisor, controla las pupilas, este compuesto podría intervenir en la toma de decisiones rápidas e inconscientes.

—*Philip Yam*



DENTRO Y FUERA: El tamaño de la pupila está relacionado con los cambios de percepción que se producen al mirar imágenes ambiguas, como este cubo de Necker.

NASA/LABORATORIO DE FISICA APLICADA DE LA UNIVERSIDAD JOHNS HOPKINS/INSTITUCION CARNEGIE DE WASHINGTON (*imágenes de Mercurio*); MATT COLLINS (*dibujo*); LISA APFELBACHER (*cubo*)

Acido que cae del cielo

Marte podría haber necesitado de la lluvia ácida para mantenerse húmedo

En Marte siguen encontrándose señales de humedad: valles profundamente horadados por antiguos ríos, vastos deltas y restos muy extendidos de la evaporación de mares han convencido a muchos expertos de que grandes zonas del Planeta Rojo podrían haber estado cubiertas por agua líquida durante mil millones de años o más. Sin embargo, la mayoría de los intentos de explicar cómo se pudieron dar unas condiciones tan clementes en el clima de Marte han fracasado. El planeta, hoy frío y reseco, necesitó una potente atmósfera de efecto invernadero para tener humedad en el pasado. Probablemente estaba envuelto por una espesa capa de dióxido de carbono, procedente de los volcanes, que atrapaba el calor, pero los modelos climáticos han indicado repetidamente que el CO_2, por sí solo, no habría podido mantener la superficie por encima de la temperatura de congelación.



Mineral de azufre (*blanco*), que sólo se forma en el agua, sacado a la luz en Marte por un robot todoterreno.

En la actualidad, inspirados por el sorprendente descubrimiento de que los minerales sulfurosos abundan en el suelo de Marte, los científicos comienzan a sospechar que el CO_2 tuvo un socio en el calentamiento: el dióxido de azufre (SO_2).

Al igual que el CO_2, el SO_2 es un gas emitido habitualmente en las erupciones volcánicas, frecuentes en un Marte juvenil. Una centésima parte o incluso una milésima parte de un punto porcentual de SO_2 en la atmósfera primitiva de Marte podría haber proporcionado el refuerzo adicional de calentamiento por efecto invernadero que necesitaba el Planeta Rojo para mantener su humedad, explica el geoquímico Daniel P. Schrag, de la Universidad de Harvard.

Puede parecer muy poca cantidad, pero, para muchos gases, incluso una concentración minúscula resulta difícil de mantener. En nuestro propio planeta, el SO_2 no proporciona un calentamiento significativo a largo plazo porque se combina de manera casi instantánea con el oxígeno de la atmósfera para formar sulfatos, un tipo de sal. La atmósfera primitiva de Marte debió de carecer de oxígeno, por cuya razón el SO_2 perduraba mucho más tiempo.

Sin oxígeno, la atmósfera se comporta de manera muy diferente, señala Schrag, para quien esa diferencia implica también que el SO_2 habría desempeñado un papel esencial en el ciclo del agua de Marte. Se resolvería así otro enigma climático: la ausencia de ciertas rocas.

El equipo de Schrag defiende que, en el Marte primitivo, una gran parte del SO_2 se combinaba con pequeñas gotas de agua en suspensión en el aire y caía como lluvia ácida sulfurosa, en lugar de transformarse en una sal, como en la Tierra. La acidez resultante inhibía la formación de espesas capas de piedra caliza y otras rocas carbonatadas.

Se creía que Marte debió de abundar en rocas carbonatadas, porque su formación es una consecuencia esencial de la atmósfera húmeda y rica en CO_2 de la Tierra. A lo largo de millones de años, este proceso de formación geológica absorbió una parte del dióxido de carbono emitido por los volcanes del tamaño suficiente para limitar la concentración del gas en la atmósfera. Una presencia menor de esta etapa de fijación del CO_2 en el Marte primitivo habría hecho que se acumulara más gas en la atmósfera, otra manera en la que el SO_2 podría haber favorecido el calentamiento por efecto invernadero, sugiere Schrag.

Algunos científicos dudan que el SO_2 pudiera ejercer los efectos climáticos descritos. Incluso en una atmósfera sin oxígeno, el SO_2 sigue siendo muy frágil; las radiaciones ultravioleta del sol fragmentan muy fácilmente las moléculas de SO_2, señala James F. Kasting, de la Universidad estatal de Pennsylvania y especialista en atmósfera. Según los modelos computarizados del clima primitivo de la Tierra, que se compara a menudo con el clima primitivo de Marte, tamaña destrucción fotoquímica estableció un límite de una milésima de punto porcentual para las concentraciones de SO_2, es decir, la misma cantidad que da Schrag y sus colegas. Kasting admite que, si bien su hipótesis podría ser válida, habría que elaborar modelos detallados para convencer a los escépticos, incluido él mismo, de que resulta posible en la práctica.

Schrag admite que los detalles no están claros, pero cita estimaciones realizadas por otros investigadores, según las cuales los volcanes primitivos de Marte podrían haber expulsado tanto SO_2 como para compensar su destrucción fotoquímica. Otros hallazgos indican también

EN BUSCA DE SULFITOS

Si el dióxido de azufre calentó las primeras etapas de Marte, como sugiere una nueva hipótesis, tuvieron que formarse sulfitos en el agua estancada de la superficie. Hasta ahora, no se han encontrado, quizá porque nadie los buscaba. El próximo robot marciano, el Laboratorio Científico de Marte, estará bien equipado para esa búsqueda. Será el primero que disponga de un difractómetro de rayos X, capaz de barrer e identificar la estructura cristalina de cualquier mineral con el que se encuentre. El lanzamiento está programado para el año 2009.



NASA/JPL/CORNELL (*izquierda*); NASA/JPL/CALTECH (*derecha*)

que una espesa atmósfera de CO_2 habría dispersado eficazmente las longitudes de onda más destructivas de la radiación ultravioleta; se trataría de otro ejemplo de una aparente colaboración, mutuamente beneficiosa, entre el CO_2 y el SO_2 en las primeras etapas de Marte.

Kasting afirma que una realimentación en el clima sulfuroso no podría haber hecho que el Marte primitivo fuera tan cálido como la Tierra, pero acepta la posibilidad de que las concentraciones de SO_2 quizá persistieran en un nivel que mantuviese el planeta parcialmente descongelado, quizás incluso con lluvias suficientes como para formar valles fluviales.

Schrag no entra en este punto. "Nuestra hipótesis no depende en absoluto de si existía un gran océano, algunos lagos o sólo unos charcos", afirma. "Decir que hubo un clima templado no significa que fuera como el del Amazonas, sino como el de Islandia, es decir, lo suficiente para crear esos valles fluviales".

Sarah Simpson

Sin rayos de Virgo

¿Por qué no nos llegan rayos cósmicos de energía excepcional procedentes del cúmulo de Virgo?

Desaparecidos: La carta celeste muestra que los rayos cósmicos de más alta energía (*círculos negros*) detectados por el Observatorio Auger tienden a alinearse con galaxias situadas a menos de 250 millones de años luz de distancia (*asteriscos rojos*). Curiosamente, el cúmulo de Virgo no da señales de emitirlos.

Para las partículas que se mueven más allá de cierta velocidad, próxima a la de la luz, la tenue neblina de radiación de microondas que inunda el espacio parece un denso mar. Al atravesar durante algunos cientos de millones de años luz ese mar, una partícula debería ir moderando su velocidad.

De ahí que, los astrónomos lleven mucho tiempo preguntándose por qué llegan a golpear la Tierra rayos cósmicos de energía excepcional. Si son capaces de atravesar el espacio sin perder velocidad, debe haber algún error en las ideas acerca de esas partículas, quizás en la misma teoría de la relatividad especial de Einstein.

El otoño pasado, sin embargo, el mayor conjunto de detectores de rayos cósmicos del mundo, el Observatorio Pierre Auger, en Argentina, establecía una correspondencia entre las direcciones de los rayos cósmicos de energía excepcional que alcanzan la Tierra y algunas galaxias cercanas. Dicha correspondencia sería muy improbable si las partículas procediesen de fuentes más distantes y atravesasen sin obstáculos el universo. Einstein ha esquivado, una vez más, el disparo contra su teoría.

¿Por qué lanzan partículas ultrarrápidas estas galaxias? Ahí ha surgido un nuevo misterio. En el congreso de enero de la Sociedad Astronómica de Estados Unidos, Vasiliki Pavlidou, de la Universidad de Chicago, miembro del equipo del Auger, explicó que el observatorio no ha observado ni un solo rayo cósmico de energía excepcional procedente de la dirección del cúmulo de galaxias de Virgo, una aglomeración de un millar largo de grandes galaxias, a una distancia de unos 60 millones de años luz. Todo lo que quiera imaginarse, lo tiene Virgo: agujeros negros, estrellas que colapsan o materia oscura. Cualesquiera que puedan ser las posibles fuentes de los rayos cósmicos de energía excepcional, dice Pavlidou, no hay duda de que Virgo contará con ellas.

Que no procedan esos rayos de Virgo podría ser una simple coincidencia estadística; los datos de un año más de observaciones podrían llevar a otra conclusión. Paul Sommers, de la Universidad estatal de Pennsylvania, también del equipo del Auger, recomienda paciencia. Los rayos cósmicos son tan poco frecuentes y el número de posibles alineaciones con galaxias tan enorme, que el equipo no se atreve a poner números al significado estadístico de tal ausencia. Pavlidou cree, empero, que la ausencia de rayos de Virgo empieza a resultar turbadora.

Muchos interpretan esa falta como una importante pista sobre la naturaleza de las fuentes de gran potencia. Los agujeros negros supermasivos han sido, durante mucho tiempo, uno de los principales sospechosos. Estos fenómenos monstruosos atraen remolinos de materia a su alrededor. Mientras los devoran, despiden chorros de gas ultrarrápidos que impulsan las partículas a altísimas velocidades. Se cree que la mayoría de las galaxias cuyos rayos de energía excepcional son detectados por el observatorio Auger tienen agujeros negros activos. Uno de los primeros en enunciar esta hipótesis, Peter Biermann, del Instituto Max Planck de Radioastronomía de Bonn, atribuye la ausencia de rayos procedentes de Virgo a fuertes campos magnéticos en los alrededores de nuestra propia galaxia. Estos campos desviarían las partículas cargadas y podrían haber hecho que las partículas procedentes de Virgo fueran atribuidas erróneamente a alguna otra fuente. La magnitud de tal desviación podría indicar que los rayos excepcionales no son protones, sino núcleos atómicos con mucha carga eléctrica, según Susumu Inoue, del Observatorio Astronómico Nacional de Japón.

Glennys Farrar, de la Universidad de Nueva York, y sus colaboradores señalan que los agujeros supermasivos de Virgo suelen tener discos de tamaño reducido. Pocos de ellos generan la potencia necesaria para lanzar rayos cósmicos de ener-

OBSERVATORIO PIERRE AUGER

gía excepcional. Puede que Virgo sea un impresionante cúmulo de galaxias, pero no tiene nada de especial en lo referente a agujeros negros supermasivos.

También por otras razones podría Virgo ser un generador inesperadamente débil de radiación de energía altísima. Pavlidou afirma que la densa aglomeración de galaxias podría suprimir diversas fuentes concebibles. Por ejemplo, las interacciones entre galaxias quizás eliminen el gas, dificulten la formación de estrellas y reduzcan el número de estrellas que estallan. Los campos magnéticos de Virgo podrían también atrapar las partículas que intenten escapar del cúmulo.

Se espera corroborar la ausencia de rayos cósmicos de energía excepcional procedentes de Virgo con los observatorios del hemisferio norte, que tienen una mejor vista del cúmulo. La Batería de Telescopios comenzó a funcionar en enero, en el oeste de Utah, y existen planes de construir un Auger Norte en Colorado. Sin embargo, el eslabón más débil del conocimiento astronómico no es tanto la detección de los rayos cósmicos cuanto la investigación telescópica ordinaria de las posibles fuentes.

George Musser

LOS OBJETOS MAS VELOCES

Los rayos cósmicos de energía excepcional son los objetos materiales más rápidos que se conocen. Si la luz tarda 300 millones de años en llegar hasta nosotros desde una galaxia lejana, estas partículas tardan 300 millones de años más un microsegundo.

Aleaciones de titanio

Superficies modificadas para obtener propiedades elásticas que aumenten su biocompatibilidad

Fines estéticos y necesidades terapéuticas han impulsado el desarrollo de materiales sintéticos, y naturales tratados, susceptibles de reemplazar, o incluso aumentar, la función de tejidos y órganos humanos. No es una ficción. Pronto podríamos contar con algo así como un catálogo de piezas de repuesto para suplir aquellos elementos de nuestro cuerpo que no desempeñen bien su tarea o cuyas características no nos satisfagan.

Es lo que se ha llegado a llamar la “revolución biónica”. Algunos lo ven como un no conformarse con la suerte o la genética, incluso una búsqueda de la perfección entendida según unos cánones dados. Pero esta revolución conlleva también un recuperar la suerte perdida o la genética malograda. Por ejemplo, cabría superar situaciones físicas, y sus consecuencias psíquicas, asociadas a la pérdida de alguna facultad por causas accidentales o enfermedades degenerativas.

En razón de la aplicación que vayan a tener, los materiales para fabricar cada pieza pueden ser elegidos por su resistencia y propiedades mecánicas, por su biocompatibilidad o por sus propiedades de reabsorción orgánica. Podemos encontrar *cerámicas bioinertes* (óxido de circonio, óxido de aluminio) en las cabezas de prótesis, *cerámicas bioactivas y biodegradables* (hidroxiapatito, fosfato tricálcico) en recubrimientos, *polímeros* artificiales y materiales poliméricos de origen natural (quitina, celulosa, colágeno) en suturas, tubos, implantes estéticos, válvulas cardiacas, piel artificial, etcétera, mientras que en sustituciones óseas se emplean determinados *metales* y *aleaciones* debido a sus buenas prestaciones mecánicas de resistencia y su baja reactividad química frente a los fluidos orgánicos.



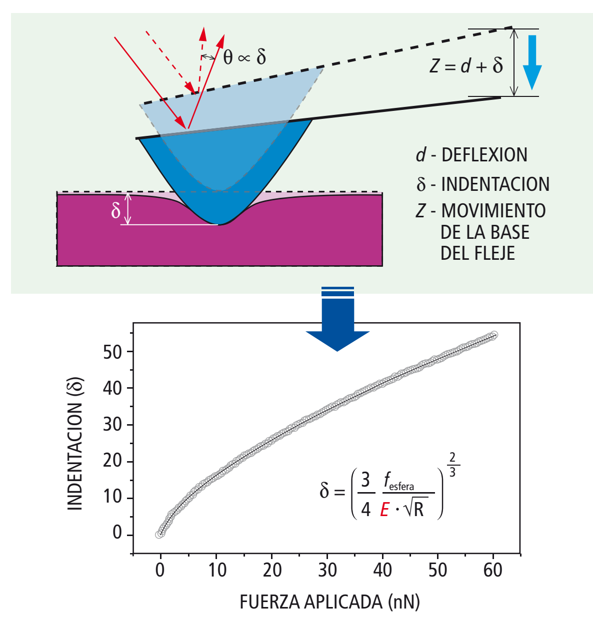
1. Mujer biónica en la que se incluyen algunas piezas, fundamentalmente óseas, sustituidas o reforzadas con biomateriales metálicos.

ILUSTRACION DE JUAN PABLO OCAL

En nuestra “mujer biónica” (*véase la figura 1*) se ven ejemplos de piezas sustituidas o reforzadas con biomateriales metálicos que pueden soportar mucha carga y realizar grandes esfuerzos mecánicos o complicados movimientos, a veces incluso varios movimientos combinados.

Encontramos desde las piezas dentales más refinadas —clavos y tornillos de acero inoxidable para reparar cualquier hueso roto o placas de titanio para reparar fracturas difíciles y daños causados por accidentes en el cráneo o en dedos— hasta la prótesis de cadera —la más común de las articulaciones artificiales que incluyen un rodamiento, u otras más complicadas para restaurar tobillos o dedos completos—, pasando por codos y rodillas artificiales que permiten giro y flexión.

Sin embargo, el uso de metales en contacto con tejidos corporales siempre conlleva el peligro de la corrosión y, con ello, en muchas ocasiones, el rechazo clínico. Para solventar este problema, se tiende hoy a modificar el material metálico de suerte que haya en su superficie, la región de contacto con el medio biológico, algún tipo de recubrimiento



2. Obtención del módulo de Young (E) mediante microscopía de fuerzas de barrido: el valor de la deformación elástica (δ) sufrido por el material ante la presión de la punta del microscopio de fuerzas de barrido: es la diferencia entre el movimiento rígido (Z) de la base del fleje y la deflexión (d) del mismo.

3. Módulo de Young (*arriba*) para una aleación Ti-15Zr-4Nb tras diferentes tiempos (0, 1,5, 6 y 24 horas) de oxidación y diferentes durezas (k) de la sonda. Se compara con valores típicos para el hueso. Abajo: morfología de la capa de óxido superficial desarrollada tras seis horas de tratamiento.

biocompatible y protector, bioinerte o bioactivo.

Un satisfactorio comportamiento ante la corrosión hace que el titanio y sus aleaciones de aluminio y vanadio (en concreto, Ti-6Al-4V) se vengan usando en implantes médicos. Estos metales desarrollan una capa protectora de sólo unos nanómetros de espesor con estar expuestos a una atmósfera rica en oxígeno, lo que les proporciona una buena biocompatibilidad en entornos biológicos agresivos. Sin embargo, en implantes óseos para articulaciones, el desgaste y la corrosión dan lugar a una liberación de iones de vanadio que pueden ser perjudiciales para el organismo, debido a la toxicidad de este elemento. Por esta razón, cada vez es mayor el interés por desarrollar aleaciones de Ti alternativas que estén exentas de V.

Dentro de esta vía alternativa, hemos centrado nuestro interés en diferentes aleaciones de Ti con niobio, aluminio y zirconio (Ti-7Nb-6Al, Ti-13Nb-13Zr y Ti-15Zr-4Nb) cuyo comportamiento, ante la corrosión y el desgaste, se había mejorado aumentando el espesor de la capa inerte mediante un tratamiento de oxidación térmica en aire a 750 ºC. En este caso nos proponemos evaluar una característica mecánica específica de los materiales en cuestión, el módulo de Young superficial, o relación entre la fuerza aplicada por unidad de área y la deformación, para comprobar la adecuación de su uso en implantes óseos.

En la figura 2 mostramos un esquema del método empleado, basado en el microscopio de fuerzas de barrido (Scanning Force Microscope, SFM). Una punta afilada sujeta a un fleje, cuya posición se controla con extrema precisión, recorre la superficie de un material y permite no sólo obtener su relieve, sino también determinar su módulo de Young (E). Si la muestra es completamente dura, la punta no penetra y todo el movimiento (Z) del fleje repercute en una deflexión (d) del mismo. Por el contrario, si la superficie se deforma elásticamente bajo la presión de la punta, la desviación (θ) de un haz reflejado en el fleje permitirá establecer cuál ha sido la penetración de la punta, esto es, calcular la deformación o indentación (δ) y con ello, aplicando la teoría de la elasticidad, estimar E. Utilizando flejes con diferentes durezas (k), la punta puede penetrar más o menos en el material y se obtiene así E en función de la profundidad.

En la figura 3 se presentan datos obtenidos con flejes de dos constantes (bajo k y alto k) para la aleación Ti-15Zr-4Nb sometida a diferentes tiempos de tratamiento térmico. La comparación con valores típicos del módulo de Young del hueso indica que las capas más superficiales de los óxidos, las que estarán en contacto, proporcionan las características adecuadas para que la aleación metálica pueda suplirlo en implantes biomédicos. Por otra parte, la morfología de la capa protectora, obtenida por un método fácil y económico, la oxidación en aire, presenta un incremento de la rugosidad superficial del material, con el consiguiente aumento de la adhesión de las células del tejido al implante.

Carmen Munuera y Carmen Ocal
Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC)

T. R. Matzelle y N. Kruse
Departamento de Física Química de Materiales, Universidad Libre de Bruselas

M. F. López
Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)

A. Gutiérrez
Departamento de Física Aplicada, Universidad Autónoma de Madrid

J. A. Jiménez
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CSIC)

Hongos tóxicos en las uvas

Las uvas alojan algunas especies fúngicas del género Aspergillus *productoras de ocratoxina A*

La contaminación de los alimentos por micotoxinas supone un gran riesgo para la salud y entraña cuantiosas pérdidas económicas para el sector agroalimentario. Las micotoxinas son metabolitos secundarios producidos por hongos; muestran toxicidad sobre todo por vía oral. A concentraciones muy bajas presentan actividad y termorresistencia.

Las ocratoxinas corresponden a micotoxinas sintetizadas por hongos de los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*. La ocratoxina A (OTA) es la más tóxica, por su capacidad nefrotóxica, carcinógena, teratógena e inmunosupresora. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) la incluye en el grupo 2b, entre los posibles carcinógenos para el hombre. Los primeros casos de ocratoxicosis se asocian a brotes espontáneos de nefropatía porcina detectados a principios del siglo pasado en los países nórdicos, años antes del descubrimiento de la OTA y de sus especies productoras.

1. Ocratoxina A.

Especies productoras de OTA

La OTA se aisló en Sudáfrica, en 1965, a partir de cultivos de *Aspergillus ochraceus*, de donde deriva su nombre. Pocos años después se detectó en cepas del género *Penicillium*. En la actualidad se conocen dos especies ocratoxígenas en este género: *P. verrucosum* y *P. nordicum*. Hasta hace poco se creía que la contaminación de los alimentos por OTA se debía sólo a *Penicillium verrucosum* en países de clima frío o templado y a *A. ochraceus* en países de clima cálido o tropical.

El género *Aspergillus* abarca una veintena de especies productoras de OTA. El efecto contaminante en alimentos se conoce sólo para algunas de ellas: *A. ochraceus* y ciertas especies de la sección *Nigri*, que incluye las especies de *Aspergillus* que presentan cabezas conidiales oscuras (aspergilos negros). En la sección *Nigri* hallamos especies que revisten especial interés biotecnológico. *A. niger* (cuya actividad ocratoxígena se descubrió en 1994 en nuestro laboratorio) se aplica a escala industrial como productora de ácidos orgánicos y enzimas. Otras se utilizan como fermentos naturales en la elaboración de alimentos y bebidas tradicionales en Oriente. También pertenece a la sección *Nigri* la especie ocratoxígena *A. carbonarius.*

OTA en uva y vino

Se han llevado a cabo numerosos estudios en diversos países con el fin detectar la presencia de OTA en variedades de vino y zumo de uva. El porcentaje de muestras positivas, así como la cantidad de OTA detectada, suelen ser mayores en ciertos vinos tintos. Se atribuye esa diferencia al proceso de elaboración.

En la vinificación, se dejan en contacto, durante unos días, el pellejo y el jugo de la uva para favorecer la extracción de los pigmentos naturales. Se cree que en esa etapa se produce la contaminación por la toxina presente en la parte externa de la uva, donde se desarrollan los hongos que la sintetizan. Algunos vinos dulces presentan mayor concentración de OTA que los tintos. Al realizarse una vendimia más tardía (para obtener una uva más dulce), los hongos ocratoxígenos se desarrollan durante más tiempo en el sustrato y aumenta, por tanto, la producción de micotoxina.

Nos propusimos determinar las especies fúngicas responsables de la producción de ocratoxina A en el vino. Los primeros resultados demostraron la intervención de *A. carbonarius*. Posteriormente, en el marco del proyecto internacional "Wine ochra-risk", en el que participaron seis estados europeos (España, Francia, Grecia, Italia, Portugal y Reino Unido) e Israel, nos propusimos identificar las especies ocratoxígenas de la viña y su diversidad. Para ello estudiamos la micobiota de la uva en distintos períodos de maduración.

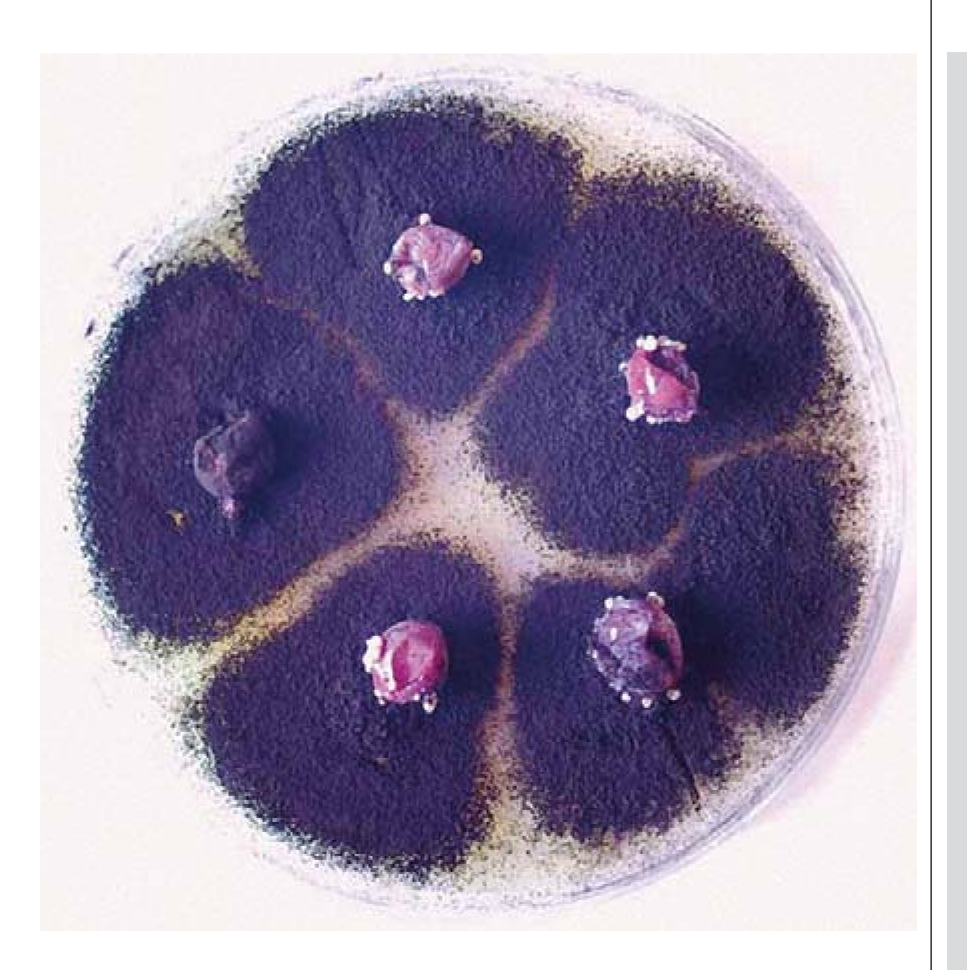
La micobiota predominante en la uva de los viñedos españoles muestreados pertenecía a los géneros *Alternaria*, *Cladosporium* y *Aspergillus*. De las especies aisladas no llegaban al 3 por ciento las que correspondían al género *Penicillium*. La abundancia inicial de *Alternaria* spp. y *Cladosporium* spp. decreció con la maduración de la uva. En cambio aumentó la presencia de especies del género *Aspergillus* (aspergilos negros en un 90 por ciento). Aunque se hallaron en todas las fases de maduración estudiadas, *A. niger* y *A. carbonarius* aparecieron, sobre todo, en la vendimia.

Capacidad ocratoxígena

Los estudios de laboratorio sobre producción de OTA en cepas de esas es-



2. Conidióforo de *Aspergillus carbonarius* en la superficie de un grano de uva.



3. Colonias de *A. carbonarius* y *A. niger* en uvas inoculadas sobre un medio de cultivo.

pecies corroboraron la destacada contribución de *A. carbonarius* en la contaminación por OTA en uva y, por tanto, en vino. No obedecía sólo a la abundancia de esa especie en las uvas, sobre todo en la vendimia, sino también al elevado porcentaje de cepas ocratoxígenas que incluye la especie (casi el 100 por ciento). Los conidios negros proporcionan a esos hongos protección frente a los efectos del sol y la luz ultravioleta. Se trata, así cabe presumir, de especies más competitivas que el resto de la micobiota de la uva, sobre todo en las condiciones de insolación existentes en las últimas fases de maduración o sobremaduración. Esas especies se consideran patógenos secundarios; suelen implantarse en la viña cuando la protección fitosanitaria es deficiente o las bayas presentan heridas.

El vino se considera la segunda fuente de OTA en la dieta europea. Los cereales, la primera. La micotoxina se detecta también en otros alimentos destinados al consumo humano y animal: café, cerveza, especias, cacao, algunos productos cárnicos y piensos. La presencia de pequeñas cantidades de OTA en muestras sanguíneas de población sana confirma la exposición continuada a esa micotoxina. De ahí que se aplique un estricto control sanitario a los productos alimentarios mencionados. La concentración máxima de OTA permitida para el vino es de 2 microgramos por kilogramo.

Casi un decenio después del descubrimiento de la capacidad ocratoxígena de *A. niger* y *A. carbonarius*, se ha relacionado la presencia de estas especies fúngicas con la contaminación por OTA en uvas, uvas pasas y vino, alimentos éstos de amplia distribución.

F. Javier Cabañes, M.ª Rosa Bragulat y M.ª Lourdes Abarca
Grupo de Micología Veterinaria. Depto. de Sanidad y Anatomía de Animales. Universidad Autónoma de Barcelona

Santiago Mínguez
Instituto Catalán de la Viña y el Vino (INCAVI). Villafranca del Penedés (Barcelona)

El color de las plantas extrat

En otros mundos, los vegetales podrían ser rojos, azules o negros

NANCY Y. KIANG

CONCEPTOS BASICOS

- El color de la superficie de un planeta revela la presencia de seres vivos, pues indica si hay organismos que captan, mediante fotosíntesis, la energía de la estrella nodriza.
- La fotosíntesis se adapta al espectro lumínico que llega a los organismos. Ese espectro resulta de la radiación emitida por la estrella nodriza y del efecto de filtrado que ejercen la atmósfera del planeta y, en el caso de los seres acuáticos, el agua líquida.
- La fotosíntesis se llevaría a cabo con luz de cualquier color (desde el violeta intenso hasta el infrarrojo cercano). Alrededor de estrellas más calientes y más azules que nuestro Sol, las plantas tenderían a absorber la luz azul; las veríamos de color verde, amarillo o rojo. En torno a estrellas más frías, como las enanas rojas, los planetas recibirían menos luz visible; los vegetales tratarían de absorber la mayor cantidad de luz posible, con lo que los veríamos de color negro.

La posibilidad de hallar vida extraterrestre ya no pertenece sólo al ámbito de la fantasía científica o de los cazadores de ovnis. En lugar de esperar a que vengan los alienígenas, somos nosotros quienes los estamos buscando. Puede que no descubramos civilizaciones técnicamente avanzadas, pero podemos rastrear "bioseñales", señales físicas y químicas de procesos biológicos fundamentales. Allende el sistema solar, los astrónomos han descubierto más de 200 mundos que orbitan alrededor de otras estrellas. Nos referimos a los planetas extrasolares. Aunque no sabemos todavía si esos planetas albergan vida, descubrirlo es sólo cuestión de tiempo. En julio de 2007, se confirmó la presencia de vapor de agua en un planeta extrasolar, al observar el paso de la luz de las estrellas a través de la atmósfera del planeta. En la actualidad, las agencias espaciales están desarrollando telescopios para buscar, mediante la observación de espectros lumínicos, signos de vida en planetas del tamaño de la Tierra.

La fotosíntesis, por ejemplo, produciría bioseñales conspicuas. ¿Cuál es la probabilidad de que opere la fotosíntesis en otro planeta? Muy elevada. En la Tierra, el proceso resulta tan eficaz, que constituye el fundamento de casi toda forma de vida. Aunque ciertos organismos viven gracias al calor y el metano que arrojan los humeros hidrotermales oceánicos, los ricos ecosistemas de la superficie del planeta dependen de la luz solar.



TIERRA ROJA, TIERRA VERDE, TIERRA AZUL: Las estrellas de tipo M (enanas rojas) son débiles; por tanto, las plantas de un mundo similar a la Tierra que orbitara alrededor de ellas deberían ser negras para absorber la luz disponible (*primer panel*). Las estrellas de tipo M jóvenes abrasan la superficie de los planetas con sus destellos ultravioleta; los organismos que allí medraran deberían ser acuáticos (*segundo panel*). Nuestro Sol es una estrella de tipo G (*tercer panel*). Alrededor de las estrellas de tipo F, las plantas recibirían demasiada luz, por lo que deberían reflejar una parte sustancial de la misma (*cuarto panel*).

KENN BROWN Y CHRIS WREN *Mondolithic Studios*


errestres

CRONOLOGIA DE LA FOTOSINTESIS EN LA TIERRA

En la historia de la Tierra, la fotosíntesis surgió pronto. La prontitud de su aparición sugiere que no fue una casualidad y que podría surgir también en otros mundos. Conforme los organismos liberaban gases que cambiaban las condiciones de iluminación de las que ellos mismos dependían, se veían obligados a desarrollar nuevos colores.

▼ Formación de la Tierra — Primer registro geológico de oxígeno atmosférico (2,4–2,3 Ga) ▼

4,6 Ga — 4 Ga — 3,4 Ga ▲ — 3 Ga — 2,7 Ga ▲ — 2 Ga

Primeras bacterias fotosintéticas. Absorbían luz del infrarrojo cercano en lugar de luz visible; producían azufre o compuestos sulfurados, no oxígeno. Sus pigmentos (probablemente bacterioclorofilas) fueron los antecesores de la clorofila.

Cianobacterias. Estas bacterias ubicuas fueron las primeras en producir oxígeno. Absorben luz visible mediante una mezcla de pigmentos: ficobilinas, carotenoides y varios tipos de clorofila.

Algas rojas y algas pardas. Poseen estructuras celulares más complejas que las bacterianas. Al igual que las cianobacterias, contienen ficobilinas, así como varios tipos de clorofila.

Algas verdes. Se desenvuelven mejor que las algas rojas o que las algas pardas en la intensa luz que llega a las aguas someras. Se las arreglan sin necesidad de ficobilinas.

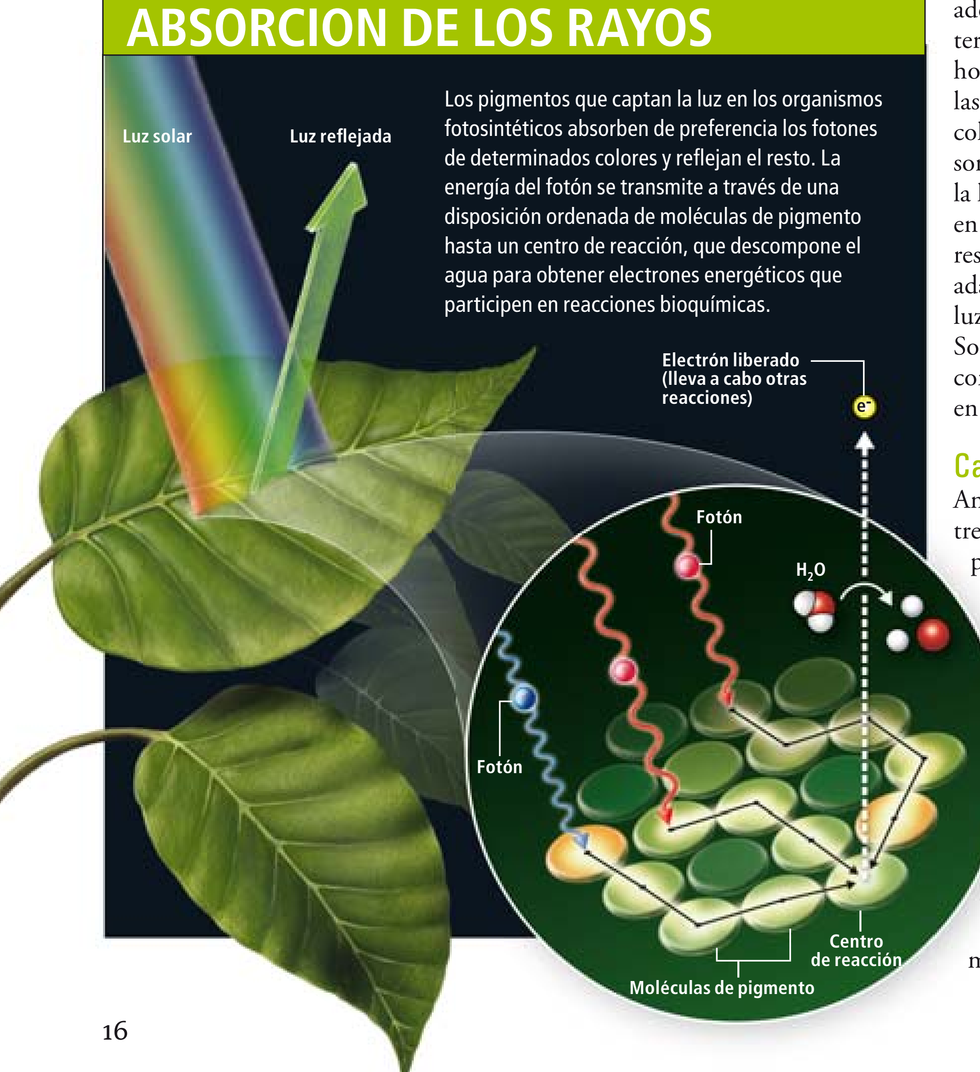
1 Ga = mil millones de años

Las bioseñales fotosintéticas serían de dos tipos: gases atmosféricos biogénicos (oxígeno y su derivado el ozono, por ejemplo) y colores en la superficie que indicaran la presencia de pigmentos especializados (como la verde clorofila). La búsqueda de esos pigmentos tiene una larga historia. Hace un siglo, los astrónomos atribuían al crecimiento de vegetación el oscurecimiento estacional de Marte. Estudiaron el espectro de la luz reflejada por la superficie marciana en busca de signos de plantas verdes. H. G. Wells, en *La guerra de los Mundos*, imaginó un escenario distinto: "El reino vegetal de Marte, en vez de tener un color predominantemente verde, posee una intensa tonalidad rojo-sangre". Aunque ahora sabemos que no hay vegetación en la superficie del planeta rojo (el oscurecimiento se debe a tormentas de polvo), Wells intuyó que los organismos fotosintéticos de otro planeta podrían no ser verdes.

De hecho, en la propia Tierra existe toda una variedad de organismos fotosintéticos, además de las plantas verdes. Algunas plantas terrestres (que crecen sobre el suelo) poseen hojas de color rojo; las algas submarinas y las bacterias fotosintéticas presentan todos los colores del arco iris. Las bacterias púrpuras absorben la radiación infrarroja del Sol, así como la luz visible. ¿Cuál será la forma predominante en otro planeta? ¿Cómo la reconoceremos? Las respuestas dependen de los pormenores de la adaptación de la fotosíntesis extraterrestre a la luz de una estrella nodriza distinta de nuestro Sol y filtrada a través de una atmósfera cuya composición quizá difiera de la que prospera en la Tierra.

ABSORCION DE LOS RAYOS

Los pigmentos que captan la luz en los organismos fotosintéticos absorben de preferencia los fotones de determinados colores y reflejan el resto. La energía del fotón se transmite a través de una disposición ordenada de moléculas de pigmento hasta un centro de reacción, que descompone el agua para obtener electrones energéticos que participen en reacciones bioquímicas.

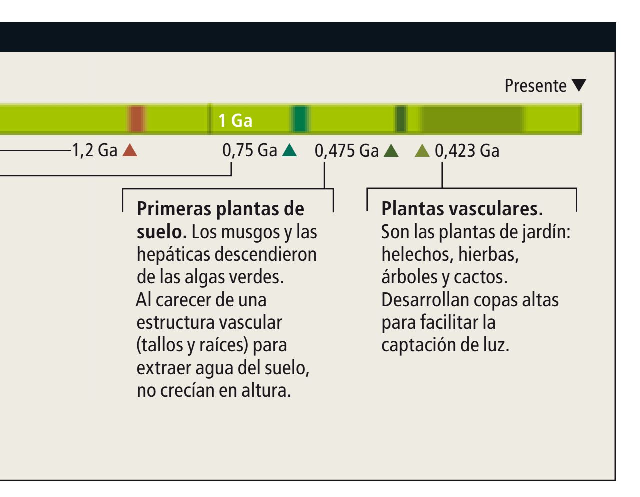


Captación de luz

Antes de indagar en la fotosíntesis extraterrestre, recordemos el modo en que opera este proceso en nuestro planeta. El espectro energético de la luz solar en la superficie de la Tierra presenta un pico en la región azul-verde. ¿Por qué las plantas reflejan el color verde, desperdiciando la que parece ser la luz más fácilmente disponible? La respuesta estriba en el fenómeno siguiente: la fotosíntesis no depende de la cantidad total de energía lumínica, sino de la energía por fotón y del número de fotones que componen dicha luz.

A pesar de que los fotones azules son más energéticos que los rojos, el Sol emite

LISA APFELBACHER



mayor cantidad de fotones rojos. Las plantas utilizan los fotones azules por su calidad y los rojos por su cantidad. Los fotones verdes, de longitud de onda intermedia, poseen menos energía y se encuentran en menor cantidad, de modo que las plantas se han adaptado para absorber menos fotones de este tipo.

El proceso fotosintético básico, que resulta en la fijación de un átomo de carbono (procedente del dióxido de carbono, CO_2) en una molécula de azúcar sencilla, requiere un mínimo de ocho fotones. La rotura de un enlace oxígeno-hidrógeno del agua (H_2O) requiere un fotón; la reacción libera un electrón que se utiliza para las reacciones bioquímicas. La generación de una molécula de oxígeno (O_2) exige la rotura de cuatro enlaces de ese tipo. Cada uno de esos fotones va acompañado de al menos un fotón adicional, que interviene en un segundo tipo de reacción que resulta en la formación del azúcar. Cada fotón debe poseer una cantidad de energía mínima para impulsar las reacciones.

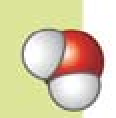
El sistema que utilizan las plantas para captar la luz solar es una maravilla de la naturaleza. Los pigmentos fotosintéticos como la clorofila no operan en solitario. Forman un entramado que recuerda una batería de antenas; cada una está sintonizada para captar fotones de una longitud de onda determinada. La clorofila absorbe preferentemente la luz roja y la azul; los pigmentos carotenoides (responsables de los intensos rojos y amarillos de la hojarasca otoñal) captan una tonalidad azul ligeramente distinta. Toda esa energía se canaliza hacia una molécula especial de clorofila que se aloja en un centro de reacción, donde se descompone el agua y se libera el oxígeno.

Esa canalización constituye la clave para entender la selección cromática de los pigmentos. El complejo molecular del centro de reacción emprende reacciones químicas sólo si recibe un fotón rojo o una cantidad de energía equivalente en otra forma. Para aprovechar los fotones azules, los pigmentos antena operan de forma concertada para convertir la energía elevada ("azul") en una energía menor (más "roja"), como las series de transformadores que reducen los 100.000 volt del tendido eléctrico a los 120 o 240 volt de un enchufe doméstico. El proceso comienza cuando un fotón azul colisiona con un pigmento que absorbe luz azul y transfiere energía a uno de los electrones de la molécula. Cuando el electrón vuelve a su estado original, libera esa energía; sin embargo, dado que se pierde cierta energía en forma de calor, libera menos energía de la que absorbió.

La molécula de pigmento no libera su energía en forma de otro fotón, sino a través de una interacción eléctrica con otra molécula de pigmento capaz de absorber esa energía inferior. A su vez, ese pigmento libera una cantidad de energía menor todavía y así sucesivamente hasta que la energía original del fotón azul se transforma en rojo. La disposición ordenada de los pigmentos convierte también en rojo los colores cian, verde y amarillo. El centro de reacción, receptor final de la cascada, se adapta para absorber los fotones

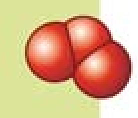
Bioseñales

Además de los colores reflejados por las plantas, otros fenómenos constituirían señales de vida:

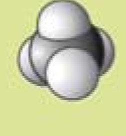


Oxígeno (O_2) más agua (H_2O). También en un mundo carente de vida, la luz de la estrella nodriza produce de forma natural una pequeña cantidad de oxígeno mediante la descomposición del vapor de agua que hay en la atmósfera. Pero el gas se agota con prontitud debido a la lluvia y a la oxidación de las rocas y los gases volcánicos. Por tanto, si en un planeta con agua líquida abunda el oxígeno, debe haber alguna fuente de oxígeno adicional. La fotosíntesis oxigénica es la principal candidata.

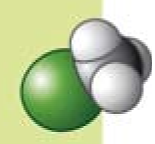




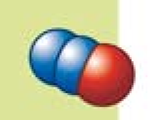
Ozono (O_3). En la estratosfera de la Tierra, la radiación descompone el oxígeno molecular, que se recombina luego para formar ozono. Junto con el agua líquida, el ozono genera una bioseñal intensa. Mientras el oxígeno se detecta a longitudes de onda del visible, el ozono se detecta en el infrarrojo, lo que resulta más sencillo con algunos telescopios.



Metano (CH_4) más oxígeno o ciclos estacionales. El oxígeno y el metano ofrecen una combinación química insólita, difícil de obtener en ausencia de fotosíntesis. Un ciclo estacional en el que las concentraciones de metano aumentan y disminuyen constituye otra bioseñal. En un planeta muerto, las concentraciones de metano son casi constantes; disminuyen lentamente conforme la luz estelar descompone las moléculas.



Cloruro de metilo (CH_3Cl). En la Tierra, este gas procede de la combustión vegetal (incendios forestales) y de la acción de la luz solar sobre el plancton y el cloro del agua de mar. La oxidación lo destruye. Pero la débil radiación de una estrella de tipo M permitiría que la concentración del gas aumentara hasta alcanzar niveles detectables.



Oxido nitroso (N_2O). Cuando la materia vegetal se descompone, libera nitrógeno en forma de óxido nitroso. Las fuentes abióticas de ese gas, como los rayos que se producen en una tormenta, son insignificantes.

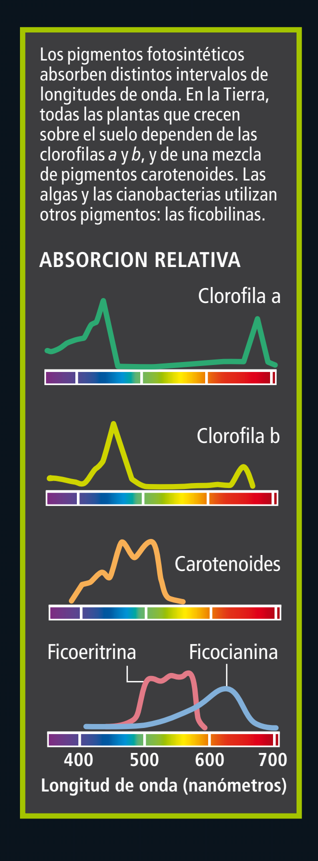
LISA APFELBACHER (*moléculas*)

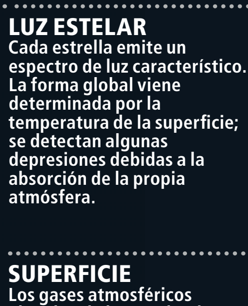
Filtración de la luz estelar

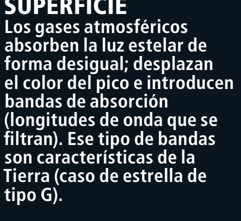
El color de las plantas depende del espectro lumínico de la estrella nodriza y del paso de esta luz a través del agua y el aire. El espectro se observa fácilmente. La filtración se ha simulado de acuerdo con base a la probable composición de la atmósfera y los efectos de la presencia de vida.

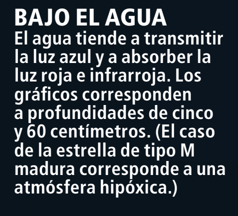
TIPO DE ESTRELLA: M (madura)
MASA*: 0,2
LUMINOSIDAD*: 0,0044
DURACION: 500.000 millones de años
ORBITA DE UN PLANETA SIMULADO: 0,07 unidades astronómicas
Relativa al Sol

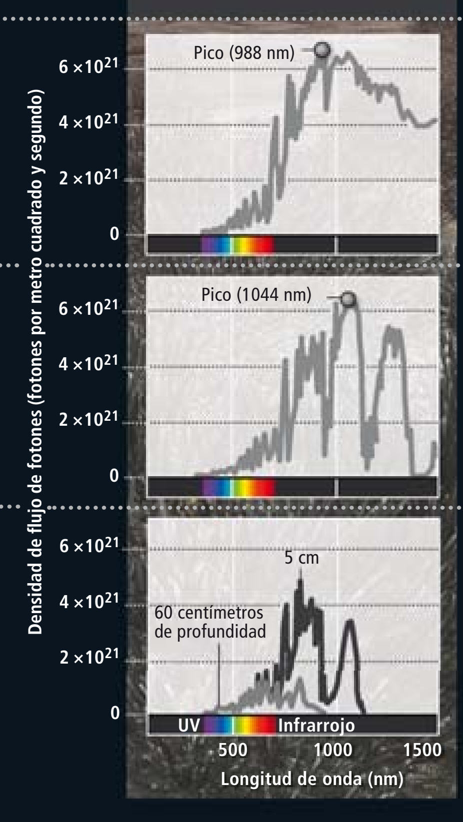
TIPO DE ESTRELLA: M (joven)
MASA*: 0,5
LUMINOSIDAD*: 0,023
DURACION: 1000 millones de años emitiendo destellos. 200.000 millones de años en total
ORBITA DE UN PLANETA SIMULADO: 0,16 unidades astronómicas

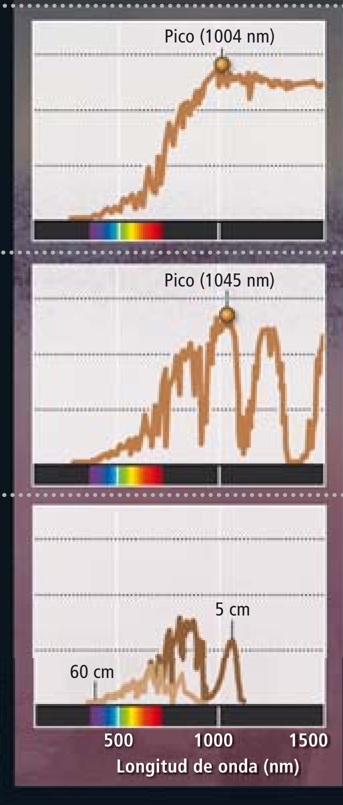












JEN CHRISTIANSEN

disponibles menos energéticos. En la superficie de nuestro planeta, los fotones rojos son los más abundantes y menos energéticos del espectro visible.

Bajo el agua, los fotones rojos no son necesariamente los más abundantes. Los nichos lumínicos cambian con la profundidad, pues el agua filtra la luz; la filtran también las sustancias disueltas y la superposición de los organismos. El resultado es una nítida estratificación de las formas de vida en función de las mezclas de pigmentos que contienen. Los organismos de las capas más profundas poseen pigmentos adaptados para absorber los colores de la luz que han traspasado las capas superiores. Las algas y las cianobacterias poseen ficobilinas, pigmentos que absorben fotones verdes y amarillos. Las bacterias que no producen oxígeno (anoxigénicas) poseen bacterioclorofilas, que absorben luz del rojo lejano y del infrarrojo cercano, la parte del espectro que alcanza las profundidades tenebrosas.

Los organismos adaptados a la oscuridad tienden a crecer con parsimonia porque dedican una fracción mayor de sus recursos a captar la escasa luz disponible. En la superficie del planeta, donde abunda la luz, la síntesis de pigmentos extra representaría una desventaja para las plantas; su uso de los colores es selectivo. Esos principios evolutivos operarían también en otros mundos.

Del mismo modo que los organismos acuáticos se han adaptado a la luz filtrada por el agua, los terrestres se han adaptado a la luz filtrada por los gases atmosféricos. En la parte superior de la atmósfera, predominan los fotones amarillos (de longitud de onda comprendida entre 560 y 590 nanómetros). El número de fotones disminuye de forma gradual para las longitudes de onda largas y, de manera más abrupta, para las longitudes de onda cortas. Conforme la luz del Sol atraviesa la parte superior de la atmósfera, el vapor de agua absorbe la luz infrarroja en varias regiones con longitud de onda por encima de los 700 nanómetros. El oxígeno da lugar a líneas de absorción, estrechos intervalos de longitudes de onda que resultan bloqueados por el gas, a 687 y 761 nanómetros. El ozono (O_3) de la estratosfera absorbe intensamente

La autora

Nancy Y. Kiang es biometeoróloga en el Instituto Goddard para Estudios Espaciales de la NASA, en Nueva York. Centra su trabajo en las simulaciones informáticas de las interacciones entre ecosistemas y la atmósfera que regulan el clima. Es miembro del Laboratorio Planetario Virtual, un equipo del Instituto de Astrobiología de la NASA que investiga formas de detección de vida en otros mundos.

TIPO DE ESTRELLA: G

Las curvas mostradas abajo muestran el espectro de la luz del Sol sobre la Tierra

DURACION: 10.000 millones de años

ORBITA DE LA TIERRA: 1 unidad astronómica

TIPO DE ESTRELLA: F

MASA*: 1,4

LUMINOSIDAD*: 3,6

DURACION: 3000 millones de años

ORBITA DE UN PLANETA SIMULADO: 1,69 unidades astronómicas

Pico (583 nm)

Pico (451 nm)

Pico (685 nm)

Ozono

Vapor de agua

Oxígeno

Pico (451 nm)

5 cm

60 cm

60 cm

5 cm

500 1000 1500

Longitud de onda (nm)

500 1000 1500

Longitud de onda (nm)

la radiación ultravioleta (UV); con menor intensidad, absorbe también en toda la gama del espectro visible.

El sistema atmosférico define, pues, ventanas a través de las cuales las radiaciones llegan hasta la superficie del planeta. La ventana de la radiación visible está delimitada en su extremo azul por la caída en el número de fotones de longitudes de onda corta emitidos por el Sol y por la absorción del UV por parte del ozono. El extremo rojo está delimitado por las líneas de absorción del oxígeno. La ancha banda de absorción del ozono a lo largo de la región visible desplaza del amarillo al rojo (unos 685 nanómetros) el pico de abundancia fotónica.

Las plantas se han adaptado a ese espectro, determinado en gran medida por el oxígeno: lo que no empece que fueran las plantas las que pusieron, en un principio, el oxígeno en la atmósfera. Cuando aparecieron sobre la Tierra los primeros organismos fotosintéticos, la atmósfera carecía de oxígeno, de modo que debieron utilizar pigmentos distintos de la clorofila. Andando el tiempo, conforme la fotosíntesis alteró la composición atmosférica, la clorofila se convirtió en el pigmento óptimo.

En el registro fósil, las pruebas sobre la fotosíntesis se remontan hasta hace unos 3400 millones de años (3,4 gigaaños o Ga); sin embargo, existen fósiles más antiguos que muestran signos de una posible "protofotosíntesis". Los fotosintetizadores primitivos tuvieron que empezar bajo el agua, en parte porque el medio acuoso facilita las reacciones bioquímicas y en parte porque proporciona protección contra la radiación solar UV (una protección que resultaba crucial en ausencia de una capa de ozono atmosférica).

Esos primeros fotosintetizadores eran bacterias subacuáticas que absorbían fotones infrarrojos. En lugar del agua, en sus reacciones químicas intervenían el hidrógeno, el sulfuro de hidrógeno o el hierro, de modo que no producían oxígeno gaseoso. En los océanos, la fotosíntesis productora de oxígeno (oxigénica) por parte de las cianobacterias comenzó hace 2,7 Ga. La concentración de oxígeno y la capa de ozono aumentaron poco a poco, lo que facilitó la aparición de algas rojas y algas pardas. A medida que las aguas menos profundas quedaron a salvo de la radiación UV, evolucionaron las algas verdes. Carecían de ficobilinas y estaban mejor adaptadas a la brillante luz de las aguas someras. Por fin, las plantas evolucionaron a partir de la algas verdes que colonizaron el suelo: dos mil millones de años después de que el oxígeno empezara a acumularse en la atmósfera.

A partir de ahí eclosionó la complejidad de la vida vegetal: desde los musgos y las hepáticas que viven a ras del suelo hasta las plantas vasculares con sus altas copas captadoras de luz, que presentan adaptaciones especiales para determinados climas. Las coníferas son árboles con copa cónica que facilita la captación de la luz en las latitudes altas, donde la radiación solar incide con ángulos pequeños; las plantas adaptadas a la sombra poseen antocianinas, que operan a modo de filtro solar allí donde hay demasiada luz. La clorofila verde no sólo está bien adaptada a la composición atmosférica actual, sino que ayuda también a conservar esa composición (un círculo virtuoso que mantiene verde nuestro planeta). Es posible que otra etapa de la evolución favorezca a los seres vivos que aprovechen, mediante el uso de las ficobilinas absorbentes de luz verde y amarilla, la sombra de los árboles. Aun así, los organismos de las capas superiores seguirían siendo verdes.

Un mundo de color rojo

Para buscar pigmentos fotosintéticos en un planeta de otro sistema solar, debemos estar

preparados para ver el planeta en cualquiera de las posibles etapas de su evolución. Podría captarse, por ejemplo, una señal de un planeta que tuviese el aspecto de nuestra Tierra hace dos mil millones de años. Los fotosintetizadores extrasolares podrían haber desarrollado facultades que no poseen sus análogos terrestres, como descomponer el agua mediante fotones con una longitud de onda mayor.

En la Tierra, la mayor longitud de onda observada en la fotosíntesis es de unos 1015 nanómetros (en la región del infrarrojo), en las bacterias púrpuras anoxigénicas. La mayor longitud de onda observada en la fotosíntesis oxigénica es de unos 720 nanómetros, en una cianobacteria marina. Pero las leyes de la física no marcan un límite superior. Un gran número de fotones de longitud de onda larga conseguirían el mismo objetivo que unos pocos con una longitud de onda corta.

El factor limitante no es la viabilidad de nuevos pigmentos, sino el espectro lumínico presente en la superficie del planeta, que depende, sobre todo, del tipo de estrella nodriza. Las estrellas se clasifican en atención a su color, que depende de la temperatura, el tamaño y la longevidad. Sólo determinados tipos de estrella tienen edad suficiente para alojar la evolución de formas de vida complejas. Nos referimos a las estrellas de tipo F, G, K y M (de más calientes a más frías). Nuestro Sol corresponde a una estrella de tipo G. Las estrellas de tipo F son mayores, más brillantes y más azuladas; en agotar su combustible tardan un par de miles de millones de años. Las estrellas de tipo K y M son menores, menos brillantes, más rojas y más longevas.

Alrededor de cada una de esas estrellas encontramos una zona habitable, una serie de órbitas en las que los planetas mantienen una temperatura que permite la existencia de agua en estado líquido. En nuestro sistema solar, la zona habitable corresponde a un anillo que abarca las órbitas de la Tierra y Marte. En una estrella de tipo F, la zona habitable para un planeta del tamaño de la Tierra es más extensa; en las estrellas de tipo K y M es más limitada. Un planeta de la zona habitable de estrellas de tipo F o K recibe aproximadamente la misma cantidad de radiación visible que la Tierra. En un planeta de esas características podría producirse una fotosíntesis oxigénica similar a la de la Tierra. El color del pigmento variaría dentro de la región visible.

Predominan en nuestra galaxia las estrellas de tipo M, o enanas rojas. Emiten menos radiación visible que nuestro Sol; sus espectros presentan un pico en la región del infrarrojo cercano. Según John Raven, biólogo de la Universidad de Dundee, y Ray Wolstencroft, astrónomo del Real Observatorio de Edimburgo, podría llevarse a cabo la fotosíntesis oxigénica con fotones del infrarrojo cercano. Un organismo necesitaría tres o cuatro fotones del infrarrojo cercano para descomponer una molécula de H_2O, en vez de los dos que bastan en el caso de las plantas de la Tierra. Los fotones proceden a la manera de las distintas fases de un cohete espacial: suministran la energía necesaria a un electrón conforme transcurren las reacciones químicas.

Las estrellas de tipo M plantean un reto adicional a la vida: cuando son jóvenes, emiten fuertes destellos UV. Los organismos evitarían la radiación UV dañina en aguas profundas; pero, ¿no les faltaría entonces la luz? De ser así, no surgiría la fotosíntesis. Sin embargo, conforme envejecen, las estrellas de tipo M dejan de emitir tales destellos. Llegadas a ese punto, emiten menos radiación UV que nuestro Sol. Los organismos no necesitarían protegerse tras una capa de ozono que absorbiese el UV; proliferarían sobre el suelo aunque no produjesen oxígeno.

FOLLAJE EN UNA ESTRELLA DE TIPO F



KENN BROWN Y CHRIS WREN *Mondolithic Studios*

En resumen, deben considerarse cuatro escenarios posibles, según la edad y el tipo de estrella nodriza:

Vida anaeróbica en el océano. La estrella nodriza es una estrella joven de cualquier tipo. No es necesario que los organismos produzcan oxígeno; en la atmósfera quizás abundan otros gases como el metano.

Vida aeróbica en el océano. La estrella nodriza es una estrella más longeva de cualquier tipo. Ha transcurrido el tiempo suficiente para que aparezca la fotosíntesis oxigénica y comience a aumentar la concentración de oxígeno atmosférico.

Vida aeróbica en el suelo. La estrella nodriza es una estrella madura de cualquier tipo. Las plantas cubren el suelo. La vida de la Tierra se encuentra ahora en esa fase.

Vida anaeróbica en el suelo. La estrella es una estrella de tipo M quiescente, de modo que la radiación UV es insignificante. Las plantas cubren el suelo, pero quizá no producen oxígeno.

Las bioseñales de la fotosíntesis serían distintas en cada uno de esos casos. La experiencia en obtención de imágenes de la Tierra por satélite nos indica que cualquier tipo de vida oceánica mostraría una distribución demasiado dispersa para detectarse con un telescopio. Por tanto, los dos primeros escenarios no producirían bioseñales pigmentarias intensas; la vida se nos mostraría sólo a través de los gases atmosféricos biogénicos. Por tanto, los investigadores que estudian los colores de la vegetación extraterrestre se centran en las plantas que crecen sobre el suelo, bien en planetas que giran en torno a estrellas de tipo F, G o M con fotosíntesis oxigénica, bien en planetas que giran en torno a estrellas de tipo M con cualquier tipo de fotosíntesis.

Negro en lugar de verde

Sea cual sea el escenario alienígena, los pigmentos fotosintéticos deben seguir las mismas reglas que cumplen en la Tierra: es decir, tienden a absorber los fotones más abundantes, los de menor longitud de onda (más energéticos) o los de mayor longitud de onda (energía a la que opera el centro de reacción). El estudio de la influencia del tipo de estrella nodriza sobre el color de las plantas ha requerido la colaboración de expertos de diversos campos, que han ensamblado todas las piezas del rompecabezas: estelares, planetarias y biológicas.

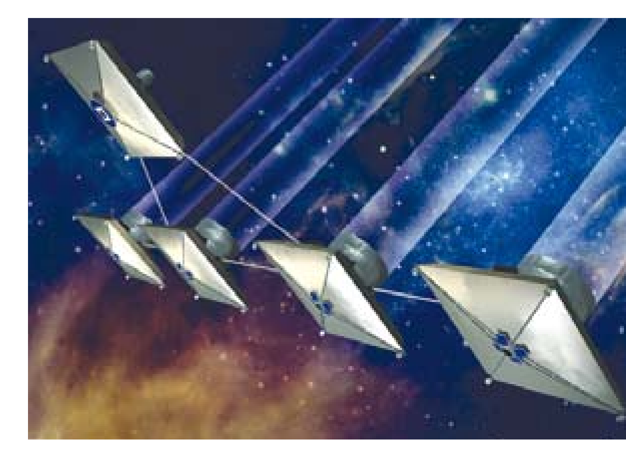
Martin Cohen, astrónomo de la Universidad de California en Berkeley, especialista en estrellas, ha recopilado datos de una estrella de tipo F (sigma Bootis), una estrella de tipo K (épsilon Eridani), otra de tipo M que emite destellos (AD Leo) y una de tipo M, hipotéticamente quiescente y con una temperatura de 3100 grados Kelvin. Antígona Segura, astrónoma de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha realizado simulaciones por ordenador de los planetas parecidos a la Tierra situados en la zona habitable de esas estrellas. Mediante modelos desarrollados por Alexander Pavlov, de la Universidad de Arizona, y James Kasting, de la Universidad del Estado de Pennsylvania, Segura ha estudiado la interacción entre la radiación estelar y los posibles componentes atmosféricos (suponiendo que los volcanes de esos mundos emiten los mismos gases que los de la Tierra) para deducir la química atmosférica de esos planetas. Se han analizado dos situaciones posibles: con una concentración de oxígeno insignificante y con una concentración de oxígeno parecida a la de la Tierra.

A partir de los datos de Segura, Giovanna Tinetti, física del Colegio Universitario de Londres, calculó la filtración de la radiación mediante la aplicación de un modelo desarrollado por David Crisp, del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena. (Se trata de uno de los modelos que se emplean para calcular la cantidad de luz que llega a los paneles solares de los robots exploradores enviados a Marte.) La interpretación de esos cálculos ha requerido la colaboración de cinco investigadores: la microbióloga Janet Siefert, de la Universidad Rice, los bioquímicos Robert Blankenship, de la Universidad de Washington en St. Louis, y Govindjeee, de la Universidad de Illinois en Urbana-Campaign, la experta en planetas Victoria Meadows, de la Universidad de Washington, y la autora, biometeoróloga del Instituto Goddard para Estudios Espaciales, perteneciente a la NASA.

Descubrimos que los fotones que alcanzan la superficie de los planetas que giran en torno a estrellas de tipo F tienden a ser azules;

BUSCADORES DE PLANETAS

La Agencia Espacial Europea (ESA) planea el lanzamiento de Darwin dentro de un decenio para medir el espectro de planetas extrasolares del tamaño de la Tierra. (El Buscador de Planetas Terrestres de la NASA hará lo mismo en caso de que la agencia consiga financiarlo.) El COROT de la ESA, lanzado en 2006, y el Kepler de la NASA, programado para 2009, rastrearán el ligero oscurecimiento que se produce cuando los planetas de tipo terrestre pasan por delante de su estrella. El SIM PlanetQuest de la NASA intentaría detectar fluctuaciones que revelaran la presencia de la estrella.



BUSCADOR DE PLANETAS TERRESTRES

CORTESIA DE NASA/JPL/CALTECH

abundan los de 451 nanómetros. En torno a las estrellas de tipo K, el pico se encuentra en el rojo a 667 nanómetros, casi como en la Tierra. El ozono desempeña una función principal: hace que la luz de las estrellas de tipo F sea más azul y, más roja, la de las estrellas de tipo M. La radiación útil para la fotosíntesis se hallaría en la región visible, igual que en la Tierra.

Por tanto, la vegetación de los planetas que giran en torno a estrellas de tipo F y M presentaría los mismos colores que las plantas de la Tierra, aunque con pequeñas variaciones. En las estrellas de tipo F, la avalancha de fotones azules con energía elevada es tan intensa, que las plantas deberían reflejarla mediante un pigmento "filtro" de tipo antocianina, que les conferiría tonalidades azules. Otra posibilidad sería que las plantas necesitaran absorber sólo el azul, descartando la luz de menor calidad comprendida entre las regiones verde y roja. Ello daría lugar a un característico extremo azul en el espectro de la luz reflejada, que no pasaría inadvertido a los telescopios.

El intervalo de temperaturas de las estrellas de tipo M admite una amplia gama de colores para los vegetales extraterrestres. Un planeta que girara en torno a una estrella de tipo M quiescente recibiría alrededor de la mitad de energía que recibe la Tierra del Sol. Aunque esa cantidad de energía excede las necesidades de los organismos (unas 60 veces más que la energía mínima que necesitan las plantas de la Tierra adaptadas a vivir en la sombra), la mayoría de los fotones se hallarían en la región del infrarrojo cercano. La evolución favorecería la diversificación de los pigmentos fotosintéticos, para captar todo el intervalo de la luz visible y de luz infrarroja. Al reflejar tan poca luz, las plantas se verían de color negro.

Un punto de color púrpura claro

La experiencia de la vida sobre la Tierra indica que en los planetas que giran en torno a estrellas de tipo F, G y K, los fotosintetizadores oceánicos primitivos sobrevivirían en la atmósfera inicial anóxica y desarrollarían la fotosíntesis oxigénica, que, en última instancia, posibilitaría la existencia de plantas en el suelo. En el caso de las estrellas de tipo M, la situación reviste mayor complejidad. Nuestros cálculos indican la existencia, a unos nueve metros de profundidad bajo el agua, de un "punto óptimo" ("sweet spot"), donde los primeros fotosintetizadores sobrevivirían a los destellos UV y dispondrían aún de luz suficiente para ser productivos. Aunque no los veríamos con un telescopio, esos organismos crearían condiciones para la aparición de la vida en la superficie del planeta. En los mundos que orbitan alrededor de estrellas de tipo M, las plantas de suelo que desarrollasen una gama más amplia de colores serían casi tan productivas como las plantas de la Tierra.

Otra cuestión de suma importancia para nuestra búsqueda atañe al tamaño de los planetas. Sea cual sea el tipo de estrella nodriza, ¿será la superficie del planeta lo bastante extensa como para ser visible a través de los futuros telescopios espaciales? La primera generación de ese tipo de telescopios verá el planeta como un punto. No se podrán obtener mapas de superficie; sólo espectros globales promediados. Tinetti estima que, para que las plantas del suelo aparezcan en ese espectro, al menos el 20 por ciento de la superficie debe estar cubierta por vegetación y libre de nubes. Por otra parte, la fotosíntesis oceánica libera más oxígeno a la atmósfera. Por tanto, cuanto más prominente sea la bioseñal pigmentaria, más débil será la bioseñal debida al oxígeno y viceversa. Los astrónomos observarían una o la otra, pero no ambas.

La presencia, en el espectro de luz reflejada por un planeta, de una banda oscura correspondiente a alguno de los colores predichos constituiría una señal de vida extraterrestre. Por supuesto, deberían descartarse "falsos positivos" debidos, por ejemplo, a minerales que produzcan la misma señal. Proponemos una posible paleta de colores indicativos de vida vegetal en otro planeta. Predecimos la existencia de otra Tierra con vegetales verdes, amarillos o anaranjados. En la Tierra, hemos determinado que la señal de la clorofila es característica de las plantas; ello permite detectar, mediante satélites, la vegetación y el fitoplancton oceánico. Deberemos descubrir las señales propias de la vegetación de otros planetas.

El hallazgo de vida en otros mundos (vida abundante, no sólo fósiles o microorganismos que a duras penas sobreviven en condiciones extremas) es una realidad cada vez más cercana. ¿En cuál de las innumerables estrellas que hay allí fuera debemos fijarnos? ¿Seremos capaces de medir el espectro de los planetas que giran en torno a estrellas de tipo M, que suelen hallarse muy próximos a la estrella nodriza? ¿Cuál es el intervalo de longitudes de onda y la resolución que necesitan los nuevos telescopios? Nuestro conocimiento de la fotosíntesis resultará crucial para el diseño de esas misiones y para la interpretación de los datos. Nuestra capacidad para buscar vida en otros lugares del universo requiere nuestros más profundos conocimientos sobre la vida aquí, en la Tierra.

Bibliografía complementaria

SPECTRAL SIGNATURES OF PHOTOSYNTHESIS II: COEVOLUTION WITH OTHER STARS AND THE ATMOSPHERE ON EXTRASOLAR WORLDS. Nancy Y. Kiang, Antígona Segura, Giovanna Tinetti, Govindjee, Robert E. Blankenship, Martin Cohen, Janet Siefert, David Crisp y Victoria S. Meadows en *Astrobiology*, número especial sobre estrellas de tipo M, vol. 7, n.º 1, págs. 252-274; marzo de 2007.

WATER VAPOUR IN THE ATMOSPHERE OF A TRANSITING EXTRASOLAR PLANET. Giovanna Tinetti, Alfred Vidal-Madjar, Mao-Chang Liang, Jean-Philippe Beaulieu, Yuk Yung, Sean Carey, Robert J. Barber, Jonathan Tennyson, Ignasi Ribas, Nicole Allard, Gilda E. Ballester, David K. Sing y Franck Selsis en *Nature*, vol. 448, págs. 169-171; 12 de julio de 2007.



Regeneración

Las salamandras muestran una asombrosa capacidad para regenerar miembros amputados. El estudio de ese anfibio abre nuevas vías para la reconstrucción de miembros y tejidos del cuerpo humano

de las extremidades

Ken Muneoka, Manjong Han y David M. Gardiner

Las extremidades de una salamandra son más pequeñas y un poco más esbeltas que las nuestras. Salvo en eso, no son muy distintas de sus correspondientes en los humanos. Las patas de la salamandra están revestidas de piel; su interior consta de un esqueleto óseo, músculos, ligamentos, tendones, nervios y vasos sanguíneos. Un conjunto laxamente organizado de fibroblastos mantiene unidos tales tejidos internos y confiere forma a la extremidad.

Pero la pata de la salamandra goza de una propiedad singular entre los vertebrados: tras haber sido amputada, vuelve a crecer desde el muñón. Así, una salamandra adulta regenera una extremidad anterior o posterior que haya perdido, tantas veces como sea necesario. Las ranas también pueden reconstruir sus miembros durante la fase larvaria (renacuajo), cuando les crecen por primera vez, pero llegadas a adultas pierden dicha facultad. En las primeras fases de desarrollo, los embriones de mamíferos cuentan con cierta capacidad de regeneración de los brotes de miembros; sin embargo, tal capacidad desaparece mucho antes de nacer. Esa tendencia hacia la pérdida de la capacidad regeneradora durante la ontogenia se observa también en la filogenia de las formas de vida superiores. Se queda sola la humilde salamandra como único vertebrado que conserva la capacidad, durante toda su vida, de reconstruir partes complejas de su cuerpo.

¿De qué modo logra la salamandra semejante proeza? ¿Cómo sabe la porción del miembro que está rebrotando, cuánto le falta por restaurar? ¿Por qué su piel no forma sobre el muñón una cicatriz que selle la herida igual que acontece en los humanos? ¿Cómo conserva el tejido de salamandra adulta el potencial embrionario para reconstruir un miembro desde la nada y en repetidas ocasiones? Cada vez estamos más cerca de dar respuesta a tales preguntas. Y si se comprende la regeneración natural, quizá pueda inducirse en los humanos la reconstrucción de miembros mutilados o facilitar la curación de otras lesiones de importancia.

Las respuestas iniciales del organismo humano ante lesiones graves no son tan distintas de las concernientes a la salamandra. Sin embargo, esas estrategias de curación toman muy pronto vías divergentes en humanos y en nuestros anfibios. En el hombre, el resultado es una cicatriz, una suerte de respuesta de regeneración fallida. Con todo, parece que poseemos cierto potencial de regeneración de partes complejas. La clave para lograr que así ocurra estriba en sacar partido de nuestras capacidades latentes, de modo que nuestra curación de heridas sea más "salamandrina". Por esa razón, nuestra investigación se centró primero en esos anfibios expertos en regeneración.

Aprender de la salamandra

Cuando se le amputa a una salamandra una de sus diminutas extremidades, los vasos sanguíneos del muñón se contraen con prontitud; se reduce la hemorragia y una capa de células dérmicas recubre rápidamente la superficie de resección. Durante los primeros días siguientes a la lesión, esa "epidermis de lesión" se transforma en la cápsula epitelial apical (CEA), una capa de células emisoras de señales indispensable para el éxito de la regeneración. En el ínterin, de la malla de tejido conectivo se desprenden fibroblastos, que migran y se desplazan por la superficie del corte para congregarse en el centro de la herida. Allí proliferan y forman un blastema, una agregación de células pluripotentes, semejantes a células madre, que servirán de progenitoras de la nueva extremidad.

Hace ya muchos años, en estudios realizados en el laboratorio de Susan Bryant, de la Universidad de California en Irvine, se demostró que las células del blastema son equivalentes a las células de la yema, o primordio, del miembro correspondiente que se desarrolla en el embrión de salamandra. Tal descubrimiento sugería que la reconstrucción del miembro a través del blastema correspondía a una recapitulación de la formación

CONCEPTOS BASICOS

- El animal experto en regeneración de miembros es la salamandra. A lo largo de su vida hace crecer renuevos perfectos de las partes que haya perdido. La comprensión de esa capacidad arrojaría luz sobre la regeneración de miembros en humanos.
- Las respuestas iniciales de los tejidos en el punto de amputación en la salamandra y en los humanos guardan cierta semejanza. Pero mientras en éstos el proceso acaba en una cicatriz, en la salamandra se reactiva un programa de desarrollo embrionario que reconstruye un miembro nuevo.
- Si aprendemos a controlar en el hombre el entorno de la herida para iniciar la curación que se da en la salamandra, tal vez logremos regenerar miembros enteros.

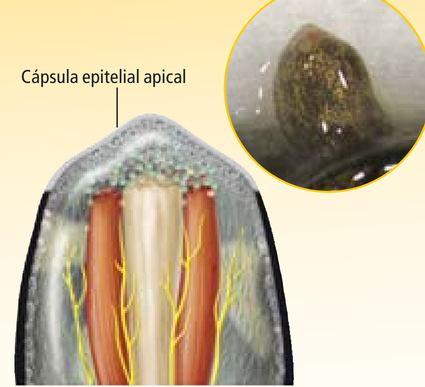
AARON GOODMAN

REGENERACION PERFECTA

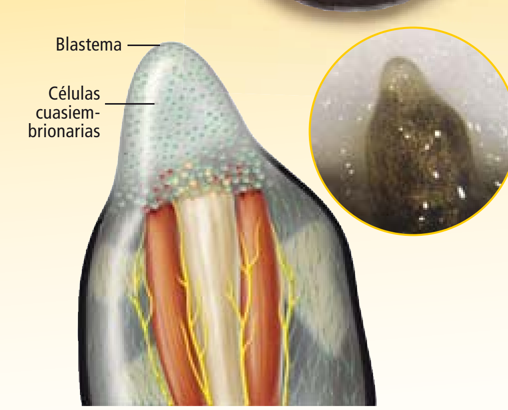
Las salamandras son los únicos vertebrados a quienes les vuelven a crecer las extremidades y otras partes del cuerpo, cualquiera que sea el momento de su vida en que las hayan perdido y tantas veces cuantas se requiera. Los estudios de la formación de un botón en las salamandras revelan que el proceso comienza con un rápido taponamiento de la herida y una carrera de células hasta el sitio de la mutilación. En las etapas siguientes se produce una reversión de esas células a un estado cuasiembrionario; la reconstrucción del miembro nuevo sigue los mismos pasos que en el desarrollo embrionario.



CIERRE DE LA HERIDA
A las pocas horas de la amputación de una pata, se produce una migración de células epidérmicas de la piel sobre la superficie de la herida para taponarla; se forma un epitelio protector.



SEÑALES DE CURACION
Las células epidérmicas forman una cresta o ápice: la cápsula apical epitelial. Esta genera señales químicas que guían el comportamiento de otras células. Comienza el peregrinaje de fibroblastos y miocitos hacia la herida provocada por la resección.



RETORNO AL UTERO
Las células que han migrado hasta la herida retrogradan hasta un estado menos especializado, cuasiembrionario; comienzan a dividirse para poblar el blastema, el primordio de un nuevo miembro.

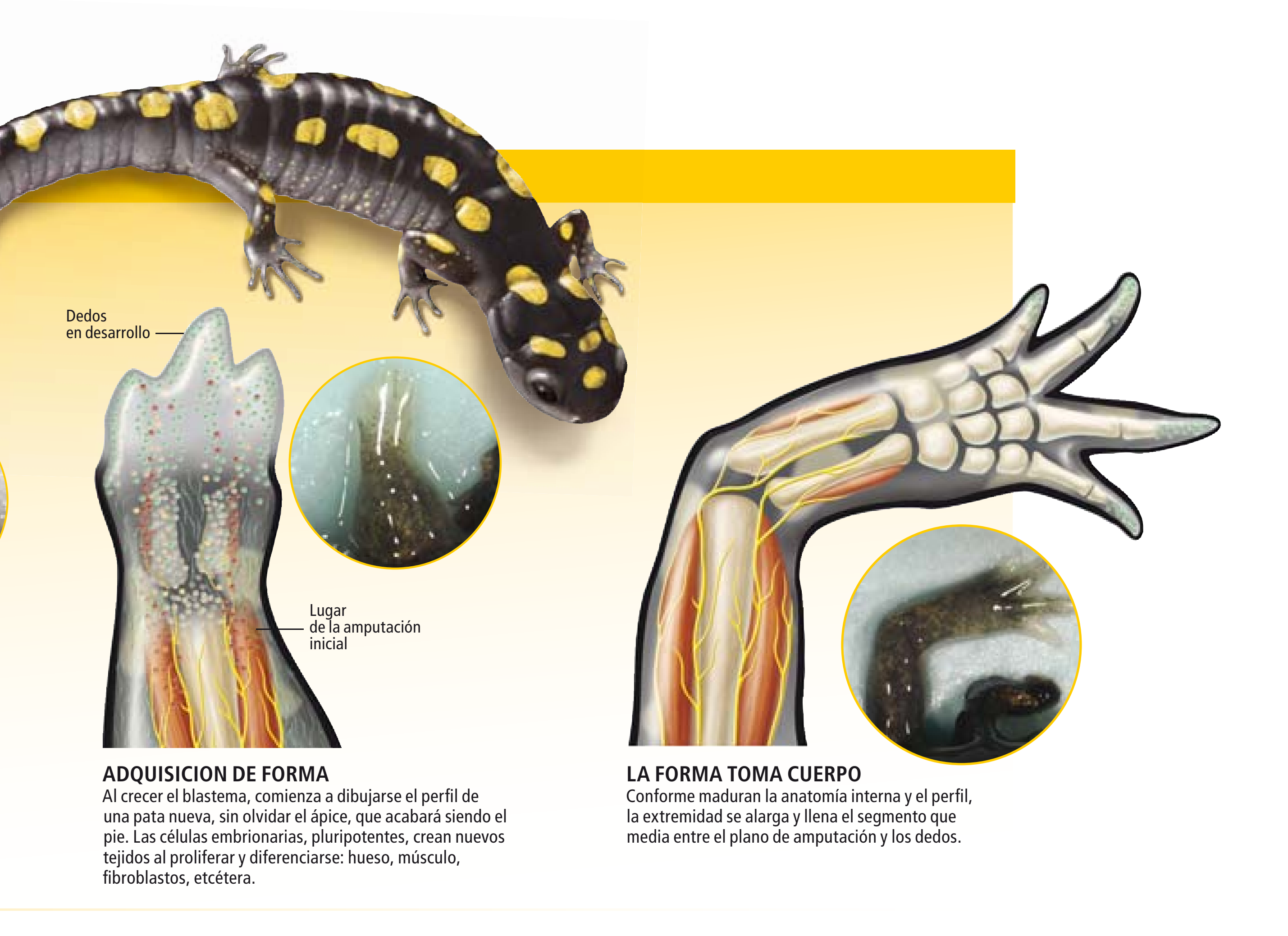
DAVID M. GARDINER (*fotografías*); ALICE Y. CHEN (*dibujos de extremidades*); LISA APFELBACHER (*salamandra*)

del miembro que tiene lugar durante el desarrollo inicial del animal. Esa hipótesis lleva implícita una conexión de suma importancia: a saber, que en una y otra situación interviene un mismo programa genético. Por tanto, dado que en los humanos las extremidades se forman en el embrión, deberíamos, en principio, disponer del programa genético necesario para su regeneración de adultos. Parecía que todo se reducía a inducir la formación de un blastema tras la amputación de un miembro.

Uno de los autores (Gardiner), que trabajaba entonces con Tetsuma Endo, de la Universidad de California en Irvine, adoptó un enfoque "simplificado" para abordar la creación de un blastema. En lugar de estudiar en la salamandra las áreas de resección, donde se formarían blastemas de forma natural, examinamos heridas simples en un lado de una pata, que suelen curarse por regeneración de la piel. Pensábamos que semejante herida en la salamandra se asimilaría a la amputación de una extremidad en un mamífero, que no llega a generar una extremidad nueva. Si conseguíamos inducir el crecimiento de todo un miembro donde solía producirse sólo una sencilla cicatrización, ahondaríamos en el proceso de regeneración.

Tras efectuar una pequeña incisión en la pata de la salamandra, una población de células epidérmicas migró y se encaminó a cubrir y sellar la herida, como hubieran hecho en una zona de amputación. Se produjo también un desplazamiento de fibroblastos de la capa dérmica, para reemplazar la piel eliminada. Pero si se desviaba un nervio hasta la herida, se inducía la producción, por parte de los fibroblastos, de un blastema. Hacía ya más de medio siglo que Marcus Singer, de la Universidad Case Western Reserve, había demostrado que, para obtener una respuesta regeneradora, era necesaria la presencia de un nervio. Nuestros experimentos revelaron los factores que, suministrados por el nervio, influían en la regeneración y alteraban el comportamiento de los fibroblastos residentes.

Pero los blastemas inducidos no progresaron hasta los últimos estadios de regeneración para formar una nueva extremidad. Se requería un ingrediente adicional. Se logró la inducción de un blastema regenerador mediante el injerto de un fragmento de piel de la misma pata, tomado del lado opuesto al de la herida; en la respuesta curativa participaban, pues, fibroblastos de otras regiones. La extremidad supernumeraria resultante crecía en un sitio impropio, aunque era anatómicamente normal. Los ingredientes para crear un blastema parecían sencillos: una epidermis de lesión, nervios y fibroblastos procedentes del lado opuesto de la extremidad. Nos centramos en



ADQUISICION DE FORMA
Al crecer el blastema, comienza a dibujarse el perfil de una pata nueva, sin olvidar el ápice, que acabará siendo el pie. Las células embrionarias, pluripotentes, crean nuevos tejidos al proliferar y diferenciarse: hueso, músculo, fibroblastos, etcétera.

LA FORMA TOMA CUERPO
Conforme maduran la anatomía interna y el perfil, la extremidad se alarga y llena el segmento que media entre el plano de amputación y los dedos.

el estudio de las funciones que desempeñaba cada ingrediente.

Sabíamos que la epidermis deriva del ectodermo, una de las tres hojas embrionarias de las fases iniciales de desarrollo. El ectodermo proporciona señales que controlan el desarrollo de extremidades a partir de los blastemas embrionarios, yemas o primordios precursores de extremidades. Las células del ectodermo se congregan en la yema para formar una cresta ectodérmica apical (CEA); ésta emite de forma transitoria señales quimiotácticas, que guían la peregrinación y proliferación de las células del blastema subyacente.

Unas de las señales críticas procedentes de la epidermis corresponden a la familia de los factores de crecimiento de fibroblastos (FCF). La CEA produce cierto número de FCF que estimulan en las células subyacentes del esbozo de extremidad la producción de otros FCF; nutren así un circuito de retroalimentación de señales entre la CEA y las células del blastema, que desempeña una función crítica para el desarrollo de la extremidad. Se cree que un circuito de retroalimentación similar, espoleado por la CEA, opera durante la regeneración de extremidades.

Hiroyuki Ide, de la Universidad Tohoku, ha descubierto que la pérdida progresiva de la capacidad de regeneración en los renacuajos guarda relación con un fallo de activación del circuito de los FCF. Mediante la aplicación de FCF10 a muñones de patitas de renacuajos ya crecidos (carentes por ello de capacidad de regeneración), Ide logró forzar el arranque de ese circuito de señalización y estimular la regeneración parcial de extremidades amputadas.

Pero hubo que atemperar el interés que provocó ese experimento: los elementos regenerados eran anormales. Su instalación irregular planteaba un nuevo reto. ¿De qué modo podía controlarse la regeneración, de suerte que todas las estructuras anatómicas que se perdían con la amputación del miembro se repusieran correctamente? Los otros actores celulares principales, los fibroblastos, resultaron ser los responsables de esa función.

Localización

Recordemos que, en los experimentos de Gardiner con extremidades accesorias, la presencia de fibroblastos no bastaba para la regeneración (en un punto de lesión existen fibroblastos y no por ello se forma una extremidad nueva). Resultaban imprescindibles los fibroblastos del lado opuesto de la pata. Ese descubrimiento ilustra la importancia de la localización celular para poner en marcha la regeneración. En un embrión, la secuencia de acontecimientos correspondiente al desarrollo de una extremidad comienza siempre con la formación de la base del miembro (el hombro o la cadera); le

Los autores

Ken Muneoka, Manjong Han y **David M. Gardiner** forman parte de un equipo multiinstitucional dedicado a la regeneración de extremidades en mamíferos. Han recibido una subvención de varios millones de dólares de la DARPA (Agencia estadounidense de Proyectos Avanzados para la Defensa) para sus investigaciones sobre la regeneración de miembros en humanos. Muneoka y Han son profesores en el departamento de biología celular y molecular de la Universidad de Tulane. Gardiner es investigador del departamento correspondiente de la Universidad de California en Irvine.

sigue la construcción progresiva de estructuras más distales, hasta la conclusión del proceso, que termina con la formación de los dedos de manos y pies. En la salamandra, en cambio, no importa dónde se produce la amputación; con independencia del lugar donde se efectúe la sección, vuelven a crecer sólo las partes que fueron amputadas.

Las células de la herida "saben" en qué ubicación se encuentran con respecto a la extremidad completa. Tal información posicional controla los procesos celulares y moleculares que conducen a la reposición cabal de las partes ausentes del miembro; se halla codificada en la actividad de varios genes. El examen de los genes que operan durante esos procesos arroja luz sobre los mecanismos que regulan dicha fase de la regeneración.

Aunque son numerosos los genes que durante el desarrollo embrionario "instruyen" a las células sobre la posición que deben ocupar en el miembro, la actividad de la familia de genes *Hox* desempeña una función crítica. En la mayoría de los animales, las células del botón de la extremidad en desarrollo se valen del código topográfico que les proporcionan los genes *Hox* para formar un miembro; sin embargo, conforme se van diferenciando en tejidos más especializados, "olvidan" de dónde vinieron. Los fibroblastos de las extremidades de la salamandra adulta, en cambio, conservan esa información y, con ello, pueden acceder de nuevo al código topográfico *Hox* en el proceso de regeneración del miembro.

Los fibroblastos portan consigo esa información al migrar a través de la herida para iniciar la formación del blastema; una vez en el blastema, las células se "comunican" entre sí para estimar cuán extensa es la lesión. El contenido de ese "parloteo" sigue siendo, en buena medida, un misterio. Uno de los resultados de la charla es que el órgano en regeneración empieza por fijar sus límites, incluido el contorno de la mano o el pie. Las células utilizan luego esta información posicional para ir rellenando las partes desaparecidas que mediaban entre el plano de amputación y los dedos del miembro.



LA MANO del ratón produce durante el desarrollo dactilar fetal el factor de crecimiento POMG4 (*en tinción púrpura*). Esa molécula opera también en la regeneración natural de las puntas de los dedos.

Dado que el grueso del miembro corresponde a músculos y huesos, resultaría útil saber en dónde se originan las materias primas destinadas a estos tejidos y qué mecanismos controlan la formación de los mismos. Cuando se inicia el proceso regenerador, acontece un fenómeno cuyo mecanismo ignoramos: la "desdiferenciación". Se trata de la reversión de una célula desde un estado maduro y especializado hacia un estadio más primitivo, cuasiembrionario, que la faculta para multiplicarse y ser progenitora de uno o más tipos de tejidos.

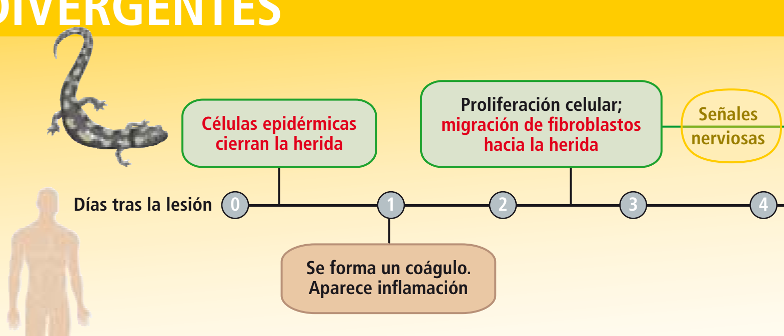
En el campo de la regeneración, el término se acuñó para describir un fenómeno observado en la salamandra: a través de microscopio, los tejidos del muñón parecían fragmentarse y dar lugar a células proliferantes, que formaban el blastema. Sabemos ahora que esas células asociadas al músculo derivan de células madre con morada habitual en el tejido muscular y no de la desdiferenciación de tejido muscular. Está por demostrar que durante la regeneración de un miembro se produzca desdiferenciación en todos los tipos tisulares. Sí sabemos, en cambio, que los fibroblastos que peregrinan hasta el blastema y se convierten allí en células blastémicas primigenias poseen la facultad de diferenciarse en tejidos esqueléticos (hueso y cartílago), así como de rediferenciarse, por ejemplo, en los fibroblastos que formarán las mallas intersticiales de la nueva extremidad.

También las células epidérmicas —otros de los principales agentes en la formación de blastemas— parece que en ciertos momentos del proceso de regeneración se hallan en retrogradación hacia un estado más próximo al

KEN MUNEOKA (*fotografías*); ALICE Y. CHEN (*dibujos*)

ESTRATEGIAS DE CURACION DIVERGENTES

Las respuestas celulares de los mamíferos y las salamandras ante una lesión grave, como una amputación, se asemejan en algunos aspectos (textos en rojo). Sin embargo, en los mamíferos el ritmo de curación es más lento y no existen señales del entorno que induzcan la reconstrucción del miembro. En las salamandras, aunque las heridas tardan pocas horas en cerrarse, no se forman cicatrices. Las células responden a señales que se envían entre sí y a las procedentes del entorno de la herida; en el plazo de unos días comienza un proceso de restauración. En los mamíferos, la curación de heridas se limita a sellar la zona lesionada, primero con una costra y luego con una cicatriz. En el tiempo que invierten las células epidérmicas humanas en cerrar una herida, la salamandra forma un blastema que prepara la regeneración.



embrionario. Hay varios genes activos en el ectodermo del embrión que revisten importancia crítica para el desarrollo de extremidades (entre ellos *Fgf8* y *Wnt7a*), pero que, al irse diferenciando el ectodermo para formar la epidermis poliestrática del adulto, se desactivan. Durante la regeneración en el adulto, las células epidérmicas que migran a través de la herida de amputación y establecen una epidermis sobre ella exhiben inicialmente actividad génica: producen proteínas de queratina para curar la lesión, actividad ésta no asociada específicamente a la regeneración. Andado el tiempo, las células epidérmicas de la herida activan *Fgf8* y *Wnt7a*, dos genes de interés para el desarrollo. Así pues, a efectos prácticos, la "desdiferenciación" corresponde a la reactivación específica de genes que desempeñan funciones esenciales en el desarrollo.

Nuestros estudios sobre salamandras revelan que el proceso de regeneración se articula en tres etapas básicas: respuesta inicial de curación de la herida, posterior formación de un blastema por células que revierten a cierto grado de estado embrionario y, por último, puesta en marcha de un programa de desarrollo destinado a construir un miembro nuevo. Esos hallazgos guían nuestros esfuerzos para promover la regeneración de miembros en humanos.

En la punta de los dedos

Aunque de forma latente, parece que los humanos conservamos cierta capacidad de regeneración natural. Así lo muestran las yemas de nuestros dedos. La capacidad inherente de regeneración de las yemas se observó hace más de treinta años en niños pequeños. Con el tiempo se han venido documentando hallazgos semejantes en adolescentes y adultos. La regeneración de mutilaciones de la yema del dedo se consigue, al parecer, por el simple expediente de limpiar la herida y protegerla con un vendaje sencillo. Si se permite que la yema se cure de forma natural, ésta recupera por sí sola el contorno, los surcos dactilares y la sensibilidad; asimismo, experimenta diverso grado de elongación. El éxito de ese tratamiento conservador se ha documentado miles de veces en revistas médicas. Resulta interesante señalar que el protocolo alternativo para tratar ese tipo de lesiones suponía una intervención para suturar un colgajo de piel sobre la herida, "tratamiento" que ahora se sabe que inhibiría la regeneración también en la salamandra, ya que dificulta la formación de epidermis sobre la herida. El mensaje que se trasluce de esos informes es que los humanos poseen capacidad de regeneración, lamentablemente suprimida por algunas de nuestras prácticas médicas tradicionales.

El estudio de la regeneración natural de la yema del dedo en humanos no resulta sencillo. No es posible ir cortando dedos con fines experimentales. Sin embargo, varios investigadores han demostrado el fenómeno en múridos, jóvenes y adultos. Dos de los autores (Muneoka y Han) han estudiado la regeneración de los extremos dactilares en ratones. Tras la amputación, se forma una epidermis de recubrimiento, a un ritmo más lento que en la salamandra. Durante la regeneración de la punta del dedo, se encuentran activos genes embrionarios clave en una población de células proliferantes e indiferenciadas en el *locus* de la herida; se trata, pues, de células de blastema. Y contamos con pruebas indirectas de que las células en cuestión derivan de fibroblastos residentes en los tejidos conectivos intersticiales y en la médula ósea.

Al objeto de estudiar las funciones de genes específicos y factores de crecimiento durante la regeneración dactilar en ratones, hemos desarrollado un cultivo tisular que sirve de modelo para la regeneración de los dedos en el ratón. Descubrimos que, si se eliminaba de la lesión de amputación el factor de crecimiento POMG4 (proteína óseo-morfogenética 4), se inhibía la regeneración. Hemos demostrado también que un ratón mutante, desprovisto del gen *Msx1*, no muestra capacidad de regeneración de los ápices dactilares. En el ápice dacti-

EN BREVE

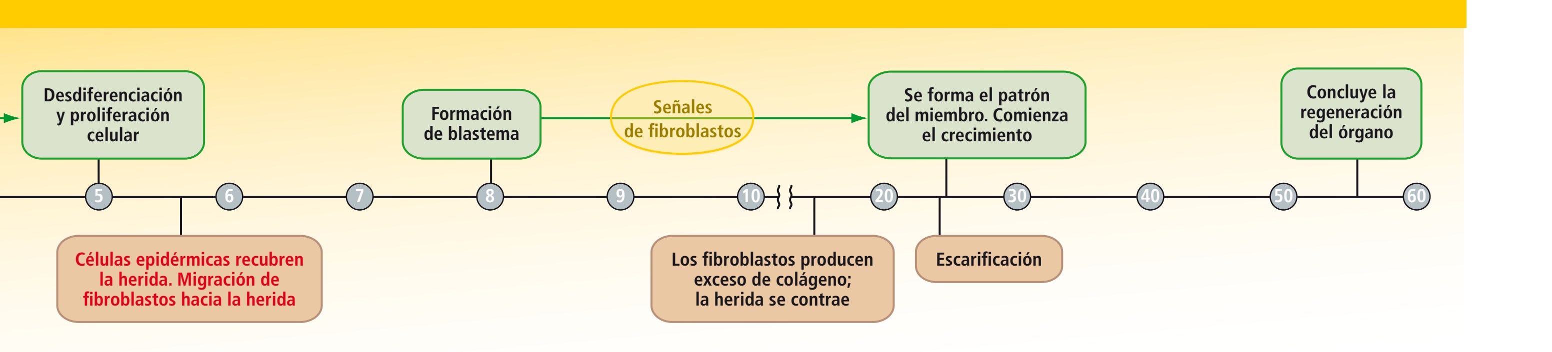


Un caimán americano joven regenera su cola amputada. La foto se tomó en Luisiana.

- La cola tiene casi el mismo diámetro que una extremidad humana. Cabe, pues, presumir que la capacidad de regeneración de un apéndice no está limitada por las dimensiones de la superficie de la herida de amputación.

- La restauración de un miembro humano quizá sea más rápida que su crecimiento inicial. En la salamandra, un mecanismo de "puesta al día" permite que el órgano que se está regenerando pase por un estadio de crecimiento rápido; el miembro resultante guarda la debida proporción con el resto del animal.

CAROL BURDSAL (*fotografía*); DE "LIMB REGENERATION IN HIGHER VERTEBRATES: DEVELOPING A ROADMAP", POR MANJONG HAN ET AL., EN *ANATOMICAL RECORD PART B: THE NEW ANATOMIST*, VOL. 287B, N.° 1; NOVIEMBRE 2005



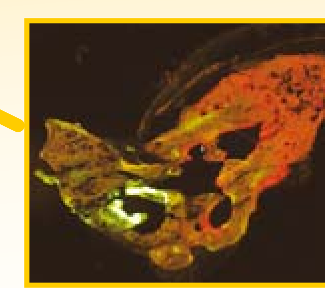
EL CAMINO HACIA LA REGENERACION

Con la mirada puesta en los miembros humanos, aprendemos a controlar, paso a paso, la regeneración en animales que la desarrollan de manera espontánea (salamandra) y a activar mecanismos similares en animales que no restauran partes grandes de su cuerpo. Para sacar provecho del potencial regenerador de los humanos, debemos reorientar nuestras respuestas de curación de heridas, alejándolas de la escarificación y haciendo que favorezcan un programa de reconstrucción de extremidades, semejante al que dirige la formación de nuestros miembros durante el desarrollo embrionario.



▲ **CURACION REORIENTADA DE HERIDAS**
Se logró que a un axolote le creciera una pata en una incisión practicada por delante de su pata trasera. Se determinaron así los mecanismos básicos que operan en las salamandras para activar la regeneración de miembros en puntos donde, de ordinario, se produciría sólo la curación de una herida.





▲ **VERTEBRADO NO REGENERADOR**
Una pata y un pie normales crecieron desde el "codo" del ala de un embrión de pollo (*arriba, derecha*) después de injertarle en el botón de un ala tejido de pata, durante el desarrollo embrionario. El crecimiento del segmento de pata amputado, en un animal que no lo regenera de forma espontánea, es indicativo de que los programas de construcción de miembros se reactivan si el entorno de la herida es favorable.

DAVID M. GARDINER (*axolote*); KEN MUNEOKA (*extremidades de pollo y ratón*)

lar fetal, *Msx1* desempeña una función crucial para la síntesis de POMG4; restauramos la respuesta regeneradora mediante la adición de POMG4 a la herida del ratón deficiente en *Msx1*. Quedaba confirmada la participación de POMG4 en la regeneración.

Cory Abate-Shen y sus colaboradores, de la facultad Robert Wood Johnson, de la Universidad de Medicina y Odontología de Nueva Jersey, han demostrado, por su parte, que la proteína codificada por *Msx1* inhibía la diferenciación de varios tipos celulares durante el desarrollo embrionario. Tal vínculo con el control de la diferenciación nos mueve a pensar que la proteína interviene en la respuesta regeneradora, promoviendo que las células se desdiferencien. Aunque *Msx1* se halla inactivo en las fases iniciales de desdiferenciación de la regeneración de las extremidades de salamandra, *Msx2* es uno de los primeros genes que se reactivan durante la regeneración; cabe suponer que cumple una función semejante.

Reto humano

Aunque la idea de regenerar un miembro humano se acerque más a la fantasía que al mundo de la realidad, las nociones que hemos descrito permiten evaluar paso a paso el modo en que podría lograrse. La amputación de un miembro humano provoca una herida superficial compleja, que secciona varios tejidos: epidermis, dermis y tejido conectivo intersticial, tejido adiposo, músculos, huesos, nervios y tejido vascular. Al examinar uno por uno esos tejidos, observamos que en su mayoría se regeneran tras una pequeña lesión.

El único tejido que carece de capacidad de regeneración es la dermis, que consta de una población heterogénea de células, muchas de las cuales son fibroblastos, las mismas células que desempeñan tan crucial función en la respuesta regeneradora de la salamandra. En los humanos y otros mamíferos, esas células, tras una lesión, experimentan un proceso de fibrosis que "sana" las heridas mediante la deposición de una red desorganizada de material matricial extracelular que acaba formando una cicatriz. La diferencia más llamativa entre la regeneración en la salamandra y el fracaso regenerativo en los mamíferos estriba en los fibroblastos: los de mamíferos forman cicatrices, mientras que los de la salamandra no.

Tal respuesta fibrótica en mamíferos no sólo obstaculiza la regeneración, sino que constituye además un problema médico grave, pues daña de forma permanente y progresiva el funcionamiento de numerosos órganos (hígado y corazón, por ejemplo) en las secuelas de lesiones o enfermedades.

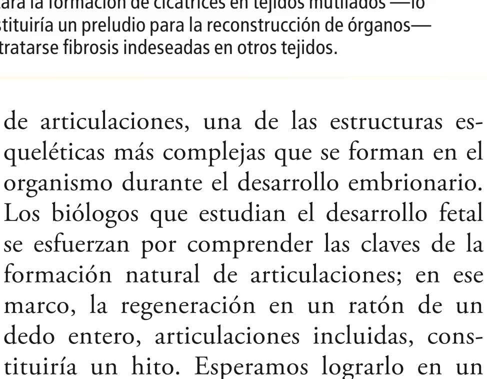
Los estudios de heridas profundas han demostrado que son al menos dos las poblaciones de fibroblastos que invaden una herida durante su proceso de curación. Algunas de esas células son fibroblastos que residen en la dermis; las demás derivan de células precursoras circulantes, semejantes a fibroblastos. Ambos tipos son atraídos hacia la herida por señales procedentes de células inmunitarias que también han acudido al lugar. Una vez en la herida, los fibroblastos peregrinan y proliferan, hasta producir y modificar la matriz extracelular de la zona. Ese proceso temprano no difiere mucho de la respuesta regeneradora de la salamandra. Sin embargo, los fibroblastos de mamíferos producen un exceso de matriz, que se entrecruza de manera aberrante conforme madura el tejido escarificante; mientras que, en la salamandra, los fibroblastos dejan de producir matriz en cuanto se restablece la arquitectura normal.



◄ POTENCIAL HUMANO
Se han documentado casos de regeneración natural de yemas dactilares amputadas en seres humanos; entre ellos, el de Lee Spievak. En la fotografía se muestra su dedo corazón, completamente curado, tras haber sido cercenado en más de dos centímetros por la hélice de un aeromodelo. La herida fue tratada con proteína en polvo, que podría haber contribuido a la regeneración, a modo de andamiaje para los nuevos tejidos.

RECONSTRUCCION DE ORGANOS
La mayoría de los tejidos humanos, tomados uno por uno, están capacitados para regenerarse. En principio, pues, la reconstrucción de partes complejas del cuerpo no parece ninguna osadía descabellada. La regeneración de miembros enteros exigirá la modificación de las señales que reciben las células del entorno de la herida, con el fin de eliminar los frenos que operan sobre el crecimiento y de reactivar los programas innatos de construcción de extremidades.







◄ YEMA DEL DEDO DE UN MAMIFERO
El crecimiento de tejido óseo nuevo (*tinción roja*) a partir del lugar en donde se amputó la punta del dedo de un ratón (*tinción verde*) muestra el potencial regenerador de los mamíferos. Se ha demostrado también la formación de un blastema en el punto donde un dedo de ratón va a regenerarse.

BLOQUEO DE LA FIBROSIS
Los fibroblastos (*inserto*) forman el tejido cicatricial sobre las heridas; asimismo, provocan enfermedades en órganos por escarificación (caso de la fibrosis pulmonar, que dificulta la respiración). Si se evitara la formación de cicatrices en tejidos mutilados —lo que constituiría un preludio para la reconstrucción de órganos— podrían tratarse fibrosis indeseadas en otros tejidos.

Existe una excepción a ese patrón mamífero: las heridas del epitelio fetal sanan sin formar cicatrices, merced a una regeneración perfecta. De lo que se desprende que el paso a la respuesta fibrótica se produce con la maduración consecuente al desarrollo de la piel. Aunque esa diferencia reflejaría un cambio en la biología de los fibroblastos, lo más probable es que resulte de una alteración de las señales del entorno extracelular de la herida que modulan el comportamiento de los fibroblastos. Cabe, pues, suponer que la alteración terapéutica de estas señales podría modificar la respuesta de curación.

Y como las amputaciones de extremidades en los estadios fetales del desarrollo no instan la regeneración del miembro mutilado, la curación de heridas sin cicatrización constituye quizás una condición necesaria, pero no suficiente, para la regeneración.

Con la perspectiva puesta en la posibilidad de inducir la regeneración de miembros en humanos, proseguimos nuestro trabajo con ratones. Hemos descrito ya un blastema natural en la herida de amputación de un ratón. Nos proponemos inducir un blastema en un lugar donde, en condiciones normales, no debería desarrollarse. Al igual que los experimentos con patas accesorias en la salamandra, un logro tal permitiría determinar los requisitos para la formación de blastemas. Confiamos en que esa línea de investigación nos revele también si, como sospechamos, es el propio blastema el que suministra las señales que inhiben la fibrosis en el lugar de la herida.

Si en un mamífero logramos generar un blastema, el siguiente reto consistirá en reconstruir el dedo entero. Esa tarea reviste mayor dificultad que la regeneración de una simple yema dactilar, ya que un dedo completo consta de articulaciones, una de las estructuras esqueléticas más complejas que se forman en el organismo durante el desarrollo embrionario. Los biólogos que estudian el desarrollo fetal se esfuerzan por comprender las claves de la formación natural de articulaciones; en ese marco, la regeneración en un ratón de un dedo entero, articulaciones incluidas, constituiría un hito. Esperamos lograrlo en un futuro no lejano.

Los avances logrados en la comprensión de la curación de heridas y la regeneración son notables. Quizá nos encontremos a sólo diez o veinte años del día en que sea posible la regeneración de partes del cuerpo humano. El llamativo contraste entre la conducta de los fibroblastos, regeneradores en la salamandra y fibróticos en los mamíferos, sugiere que la senda que conduce al éxito en la regeneración está bordeada por estas células. No menos alentador es el descubrimiento reciente de Howard Y. Chang y John L. Rinn, de la Universidad de Stanford, sobre fibroblastos humanos adultos: éstos, lo mismo que los fibroblastos de salamandra, conservan un recuerdo del sistema de coordenadas espaciales que sirvió para establecer el plan del cuerpo en las fases iniciales del desarrollo embrionario.

Dado que tal información posicional es necesaria para la regeneración en la salamandra, su existencia en los fibroblastos humanos refuerza la factibilidad de recurrir a ella para activar los programas de desarrollo necesarios para la reconstrucción.

Ahora, cuando observamos el renacimiento de un brazo en una salamandra, nuestra perplejidad ya no es tanta como fue. Los humanos no tardarán en poner a su servicio esa facultad, verdaderamente impresionante, al objeto de reemplazar tejidos lesionados o enfermos.

Bibliografía complementaria

LIMB REGENERATION. Panaglotis A. Tsonis. Cambridge University Press, 1996.

ONTOGENETIC DECLINE OF REGENERATIVE ABILITY AND THE STIMULATION OF HUMAN REGENERATION. David M. Gardiner en *Rejuvenation Research*, vol. 8, n.º 3, págs. 141-153; 1 de septiembre 2005.

LIMB REGENERATION IN HIGHER VERTEBRALES: DEVELOPING A ROADMAP. Manjong Han et al. en *Anatomical Record Part B: The New Anatomist*, vol. 287B, n.º 1, págs. 14-24; noviembre de 2005.

APPENDAGE REGENERATION IN ADULT VERTEBRATES AND IMPLICATIONS FOR REGENERATIVE MEDICINE. Jeremy P. Broches y Anoop Kumar en *Science*, vol. 310, págs. 1919-1923; 23 de diciembre de 2005.

REGENERATIVE BIOLOGY AND MEDICINE. David L. Stocum. Academic Press, 2006.

AL BEHRMAN *AP Photo (Spievak)*; LIVING ART ENTERPRISES, LLC *Photo Researchers, Inc. (radiografía)*; L. Y. LEUNG Y D. J. TSCHUMPERLIN *Harvard School of Public Health (fibroblasto, inserto)*; JIM WATSON *AFP/Getty Images (amputado)*

Matteo Ricci, el misionero sabio

Matteo Ricci y otros jesuitas veían en la ciencia occidental un argumento para la conversión de China. Esta estrategia fracasó, y no sin consecuencias en los siglos posteriores

Dagmar Schäfer

El teorema de Pitágoras se enseña hoy en los colegios. En el siglo XVII era ya bien conocido por los sabios de Europa. Pero no en China. Llevarlo allá fue el gran mérito del padre jesuita Matteo Ricci (1552-1610), cuyo alumno Xu Guangqi presentó en 1603 al prefecto de Shangai, para efectuar unos cálculos acerca del curso de un río, un método que compaginaba el procedimiento tradicional chino con el teorema de Pitágoras. Con ello dio a conocer por primera vez en China la fórmula griega.

Ricci vivía desde hacía veinte años en el "Imperio del medio". Su misión: la cristianización de la élite política e intelectual. Como miembro de la Compañía de Jesús, fundada en 1534 por Ignacio de Loyola (1491-1556), disfrutaba de una excelente formación en física, geografía, alquimia, matemáticas y astronomía. Su actividad misionera se regía por una idea: los paganos, impresionados por las conquistas científicas y técnicas de Europa, tendrían que reconocer la superioridad de la fe católica.

Durante un siglo siguieron los jesuitas esta estrategia. Tradujeron textos matemáticos y astronómicos a la lengua china escrita y llevaron a China aparatos astronómicos y armas europeas. Hasta hace pocos años, a Matteo Ricci y sus sucesores se los tenía por acertados transmisores del saber de Occidente a Asia. Sin embargo, el cristianismo no consiguió la propagación que buscaban. Más aún, no se impuso en la China una ciencia según el modelo europeo; sus intelectuales mantuvieron durante siglos una desconfianza hacia el pensamiento occidental. A la luz de las modernas ciencias de la cultura que investigan críticamente los auténticos resultados de aquel intercambio científico, el balance es muy distinto: la estrategia de Ricci fracasó.

CONCEPTOS BASICOS

- A finales del siglo XVI, misioneros jesuitas italianos llegaron a China. Matteo Ricci fue uno de ellos. Esperaba que el saber científico occidental avalara que la religión verdadera era la cristiana.
- Introdujo en China el teorema de Pitágoras y los mapamundis. Sin embargo, las élites chinas no valoraron en mucho la ciencia occidental de aquella época.
- La idea de misión prevaleció entre los jesuitas mientras comunicaban sus conocimientos a los chinos. Fue contraproducente: el cristianismo no se extendió por China y esa supeditación a una religión foránea fue una traba para que los orientales, convencidos además de que la superioridad intelectual era suya, aceptasen la ciencia de Occidente.

Los primeros cristianos de China

La tentativa misionera jesuita no fue la primera, ni tampoco la última. Hacia el siglo VIII d.C. se establecieron en el noroeste de China algunas comunidades nestorianas exiliadas. El nestorianismo, culto cristiano originado en Constantinopla, era para Roma una herejía. Habían caído aquellas comunidades en el olvido hacía mucho para cuando unos misioneros fundaron el episcopado de Pekín en 1307; eran los días de la dinastía mongola Yuan (1271-1368), tolerante con otras religiones.

Sesenta años más tarde, en 1368, los Ming se hicieron con el poder. Poco después, los extranjeros ya no eran bien vistos. Hay que decir que el almirante Zheng He, en las primeras décadas de la dinastía, partió con una flota gigantesca para explorar, pero a partir de 1433 el interés del emperador por otras culturas desapareció. Los Ming no aislaron completamente su imperio, tal como a veces se dice; no obstante, los contactos se limitaron como mucho al comercio: una gran parte de la plata que portugueses y españoles ganaban en las colonias americanas la entregaban a cambio de productos chinos de lujo. Cuando los jesuitas comenzaron su trabajo en 1582, ya no existía en China ninguna comunidad cristiana.

Las perspectivas no parecían malas para los jesuitas. Los sabios chinos mostraban por entonces un gran interés por la investigación en la agricultura, la geografía, la astronomía, las matemáticas o la botánica, es decir, en los

campos del saber en los que eran expertos aquellos eruditos misioneros. Benjamin Elman, de la Universidad de Princeton, especialista en Asia oriental, interpreta esto como la expresión de una crisis; algunos sabios protestaban contra un sistema educativo centrado en las interpretaciones filosófico-filológicas y la ética.

El historiador Timothy Brook, antes en la Universidad de Toronto, se inclina por la creciente actividad comercial de la sociedad como causa de la nueva tendencia. Algunos productos empezaron a fabricarse en grandes cantidades y de manera más eficiente en talleres especializados. Ya no los consumían sólo las clases altas. Con ello creció el comercio interior, los bienes materiales ganaron importancia y hubo un cambio de valores.

Un tercer motivo de la nueva orientación de los sabios fue también que los emperadores de finales del siglo XVI descuidasen cada vez más sus deberes y que el aparato estatal se estuviese derrumbando. Muchos intelectuales criticaban el escaso conocimiento de los soberanos en las cuestiones prácticas. El interés de Xu Guangqi, alumno de Ricci, por la agronomía, las matemáticas y la astronomía (tres disciplinas enseñadas entonces con fines prácticos) corresponde a esa tendencia intelectual que a la llegada de Ricci se encontraba en pleno apogeo.

Con todo, no se lo ponían fácil. Los extranjeros no habían sido nunca recibidos con los brazos abiertos. Las autoridades permitieron sólo esporádicamente que los primeros jesuitas Alessandro Valignano (1539-1606) y Michele Ruggieri (1543-1607) tuvieran algún trato con la población. Sólo cuando Ruggieri, en 1582, comenzó a instruir a todos los misioneros —entre ellos también el recién llegado Ricci— en la lengua y la cultura chinas, pudo establecer la orden una residencia permanente en Zhaoqing. Con todo, esta ciudad estaba situada en el sur del imperio, lejos del centro del poder político de Pekín. Tuvieron que transcurrir aún veinte años para que los jesuitas obtuvieran el permiso de establecerse en la capital.

Mapamundis para la propaganda

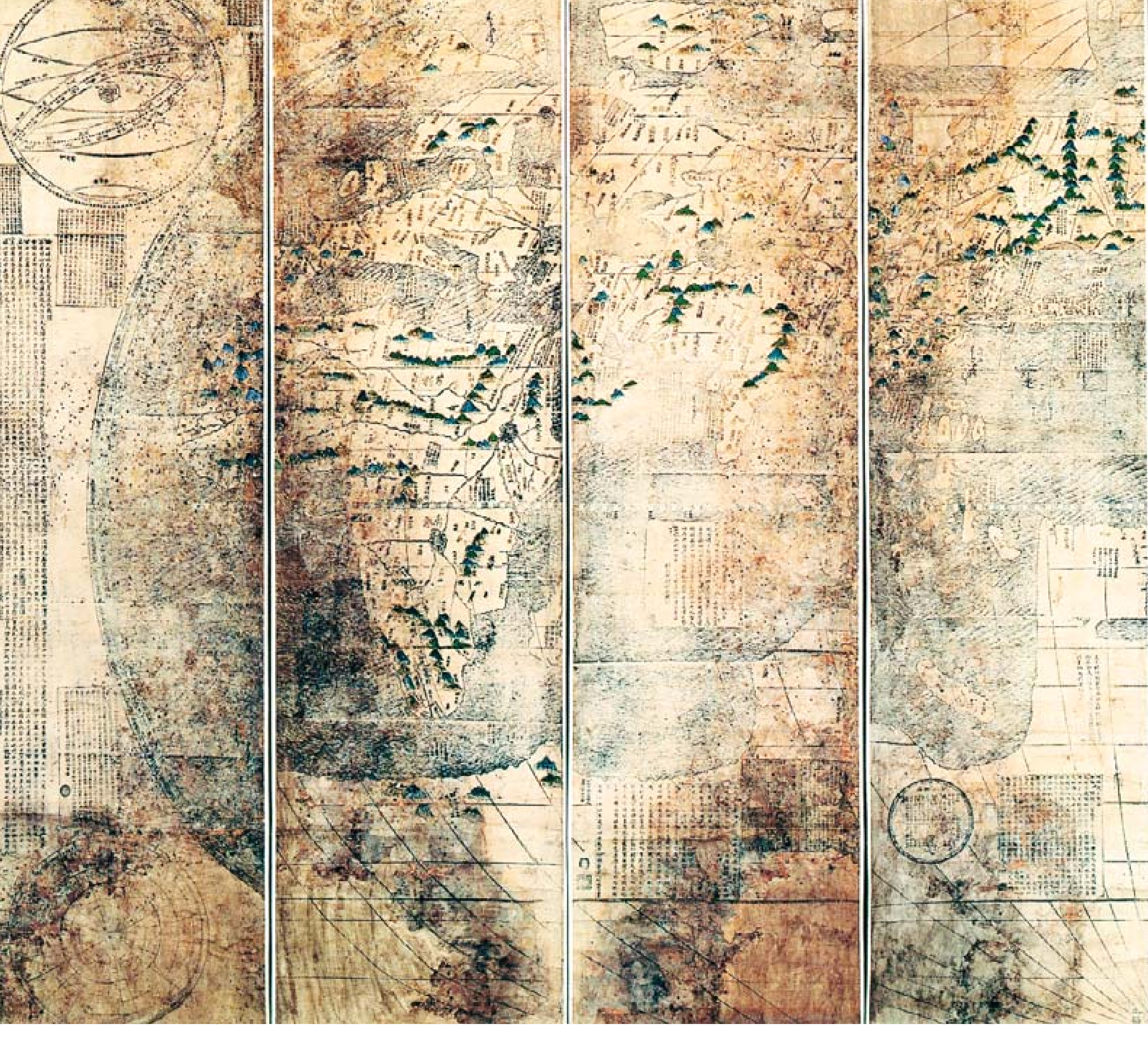
Saber a cambio de fe. ¿Cómo concebía este intercambio Matteo Ricci? ¿Cómo pretendía impresionar a la élite espiritual y política? Uno de los medios más conocidos a que recurrió era un mapamundi que tenía colgado en casa. El mismo lo había confeccionado partiendo de los mapas de Mercator (1569) y de Ortelius (1570). Lo que más fascinaba a sus visitantes era que la China estuviese rodeada por tierras más extensas y que el mundo se dividiera en cinco continentes. El prefecto de Zhaoqing pidió finalmente una traducción al chino y Ricci preparó un mapa en el que Asia estaba dividida en cien países distintos, aunque China ocupaba el puesto más importante. Europa la dividió en setenta estados, con Italia en el lugar visiblemente más destacado. Africa estaba compuesta por cien países y América, como era corriente entonces, aparecía dividida en dos mitades, septentrional y meridional. Para las indicaciones geográficas y para los nombres que eran corrientes en Europa, Ricci eligió transcripciones fonéticas.

El mapa allanó el camino a los jesuitas hacia la capital. Allí, le satisfizo al emperador Zhu Yijun (reinó entre 1573 y 1619), más conocido con el nombre de su período de reinado, Wanli. En 1603 ordenó una edición en ocho tablas, cada una de dos metros de largo por medio metro de alto. Cinco años más tarde encargó una representación en seda, compuesta de doce partes, y en 1609 acabó Ricci otra versión en dos tablas. Se puede decir que, cuando el emperador hizo colocar



1. SACERDOTE, CARTOGRAFO Y ASTRONOMO, el jesuita Matteo Ricci (1552-1610) fue para los historiadores durante mucho tiempo un intermediario entre la ciencia occidental y el imperio chino. Sin embargo, su obra y la de sus sucesores se valora hoy de forma mucho más crítica.

PINTURA DE EMMANUELE YU WEN-HUI, 1610; CORTESIA DEL INSTITUTO MATTEO RICCI, MACERATA/*Spektrum der Wissenschaft*



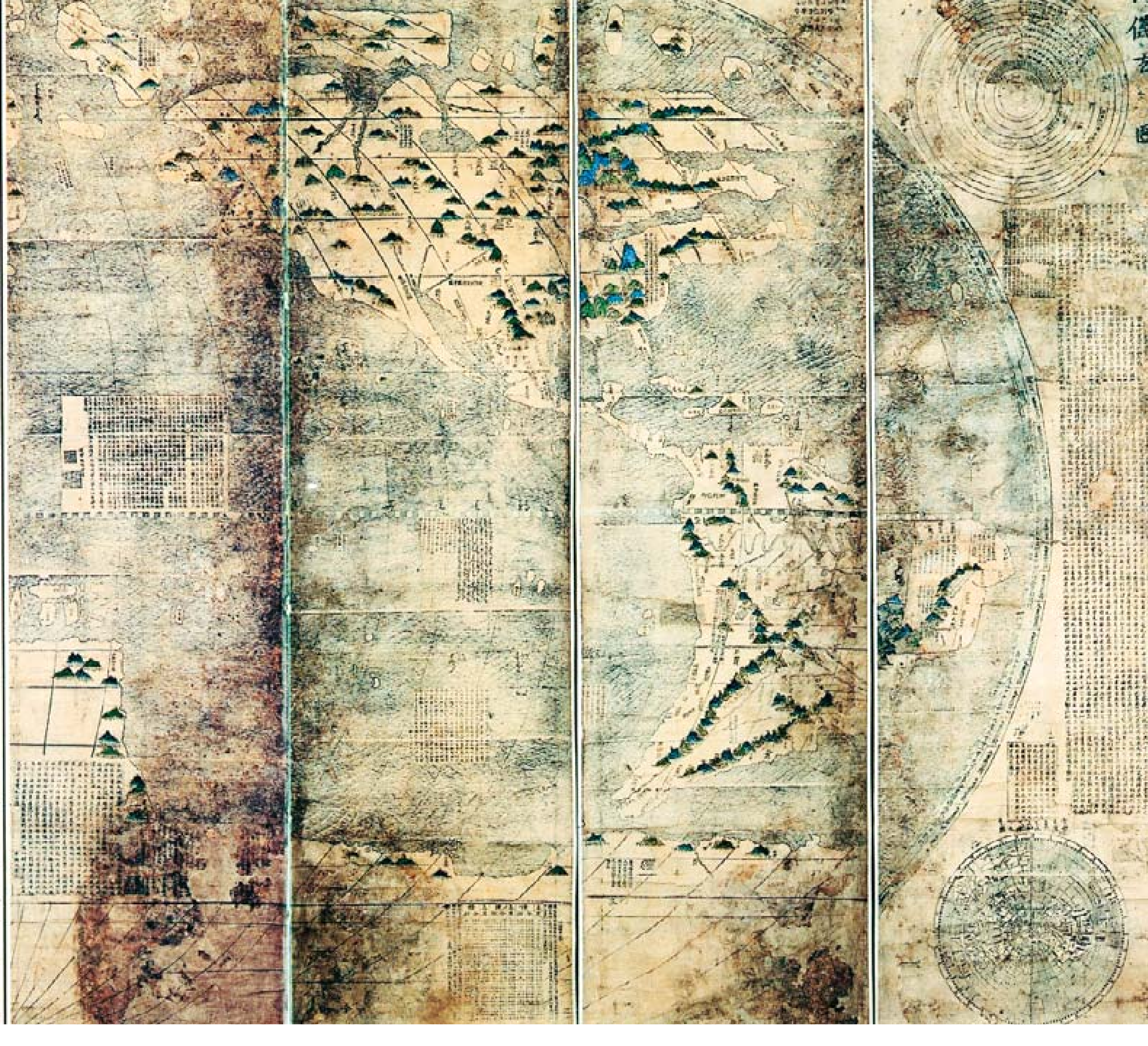
éstas a su izquierda y a su derecha, los jesuitas entraron en la Corte. El mismo Ricci designó el mapamundi como “lo mejor y más útil que en aquel tiempo podía realizarse para acercar a China nuestra santa fe”.

¿No exageraba un poco? Aunque cada vez más sabios copiaban su mapamundi, su influencia seguía siendo escasa. Según Cordell D. K. Yees, del Colegio de San Juan de Maryland, experto en historia de la cartografía, sólo unos pocos cartógrafos chinos adoptaron su metodología y contenidos, y por lo general de manera incompleta. De este modo, en 1697 el sabio Wang Qi incluyó en su obra “Sancai tuhui” (recopilación ilustrada de los tres dominios, Cielo, Tierra, Hombre) un mapa en el que copiaba los modos de representación de los jesuitas, aunque sin emplear la terminología ideada por Ricci. Hoy sabemos que los chinos tenían para muchos de aquellos lugares sus propios nombres, sin relación alguna con las transcripciones fonéticas del misionero. Al menos desde el séptimo viaje del almirante Zheng He, entre 1405 y 1433, muchos países de la zona asiática estaban ya bien documentados. Ricci sabía poco de eso, de ahí que se inventase nuevos nombres.

Modelo sin instrucciones

Sin duda hay que preguntarse si algún aspecto metodológico influyó en la cartografía china. Wang Qi y otros adoptaron la división occidental del mundo en un entramado de longitudes y latitudes, pero sobre un fundamento distinto. Vieron una analogía con las 28 casas de la Luna de su sistema astronó-

MATTEO RICCI, LI ZHIZAO, MAPA GEOGRAFICO DEL MUNDO, PEKIN 1603; CORTESIA DEL INSTITUTO MATTEO RICCI, MACERATA/*Spektrum der Wissenschaft*



mico. Proyectar sobre la Tierra un sistema de coordenadas celestes concordaba con los ideales chinos de simetría. Ricci insistió en esa asociación con la esperanza de una mayor aceptación de la técnica occidental. Sin embargo, con tal interpretación el verdadero fin de las coordenadas quedaba en segundo plano. Se las copió, pero no se las utilizó para lo que se las había concebido, determinar las distancias y la posición absoluta.

Aun sin este problema, el modelo occidental de cartografía tampoco hubiese cuajado, ya que Matteo Ricci proporcionó a los chinos una muestra, pero no les enseñó cómo proyectar sobre un plano la topografía de la superficie curvada de la Tierra de manera matemáticamente correcta. No debían de reconocer en su proceder anterior una desventaja, así que siguieron colocando los puntos geográficos significativos según su dirección y distancia en un marco cuadrado. Este método bastaba para las distancias cortas que interesaban en aquella época, en las que la curvatura de la Tierra carecía de importancia. Además, la mayoría de los sabios creía que la Tierra era un disco.

Tan sólo unos treinta años después de la llegada de Ricci, su hermano de Orden Ferdinand Verbiest (1623-1688) llevó también la técnica occidental de confección de mapas a la Corte. Aunque entre tanto había pasado a reinar en China la dinastía manchú Qing, de nuevo los intelectuales mostraron poco interés. Se manifestaba así, según la opinión de la sinóloga Harriet Zurndorfer, de la Universidad de Leiden, un problema cultural de fondo.

2. LA CONFECCION DE MAPAMUNDIS era un arte desconocido en China. Pese a que se le pidieron a Matteo Ricci muchos ejemplares —aquí una edición a la acuarela para la corte imperial—, la obra no le reportó el reconocimiento esperado

China otorgaba a la ciencia europea un escaso valor. Esto concuerda con las quejas de Ricci, quien lamentaba la altanería del Imperio con respecto a otros países, en la creencia de que "el mundo entero era bárbaro y sin cultura en comparación con el Imperio". Pero también el jesuita no estaba menos convencido de la superioridad de la cultura europea en general, y de los italianos en el campo de las matemáticas en particular. Lo comprobamos cuando dejó escrito, al principio de su traducción al chino de la geometría de Euclides: "Mi muy alejado país de Occidente sobrepasa en mucho, aunque no por sus dimensiones geográficas, a sus vecinos por un método analítico estricto, en el que se basa para estudiar los fenómenos de la Naturaleza".

Algunos logros de la ciencia europea, especialmente la cartografía, no sirvieron exclusivamente para fines honorables, sino para su utilización militar. Con todo, para el emperador chino esto tampoco era un argumento. La publicación de la imagen más exacta de accidentes geográficos muy alejados tenía para un pueblo de jinetes como el manchú escasa relevancia estratégica. Del mismo modo que los anteriores Ming, los soberanos Qing renunciaron a expandirse más allá del espacio asiático oriental. Dentro de su esfera de intereses, las relaciones geográficas se conocían suficientemente bien. Sólo cincuenta años después de Ricci pudo otro jesuita, Dominique Parrenin (1665-1759), convencer al emperador Kangxi de combinar la ciencia cartográfica occidental y la china. El goteo constante horada la piedra: el emperador había sido instruido en su juventud por Verbiest. Siguiendo modelos previos chinos, los misioneros confeccionaron mapas detallados del Imperio y de sus zonas fronterizas. De este modo surgió el atlas de Kangxi, que abarcaba el saber de ambas culturas.

En los siglos XVI y XVII los mapas significaban, tanto para los chinos como para los europeos, algo más que una simple imagen del mundo. Para Matteo Ricci, su *mapamundi* fue originariamente una forma de meditación sobre su peregrinaje a través del continente euroasiático. Además, el mapa ilustraba las extensiones que aún debían ser investigadas y evangelizadas. Por otra parte, los jesuitas utilizaban los mapas para instruirse en un arte mnemotécnico de tradición medieval.



3. EL GLOBO CELESTE DE VERBIEST sigue hoy colocado sobre la plataforma de observación del antiguo observatorio, en medio de un barrio comercial de Pekín. La constelación del Gran Carro (*a la derecha*) tenía en China una importancia especial: transportaba al mítico hijo del cielo.

INSTITUTO MAX PLANCK DE HISTORIA DE LA CIENCIA, BERLIN/*Spektrum der Wissenschaft*

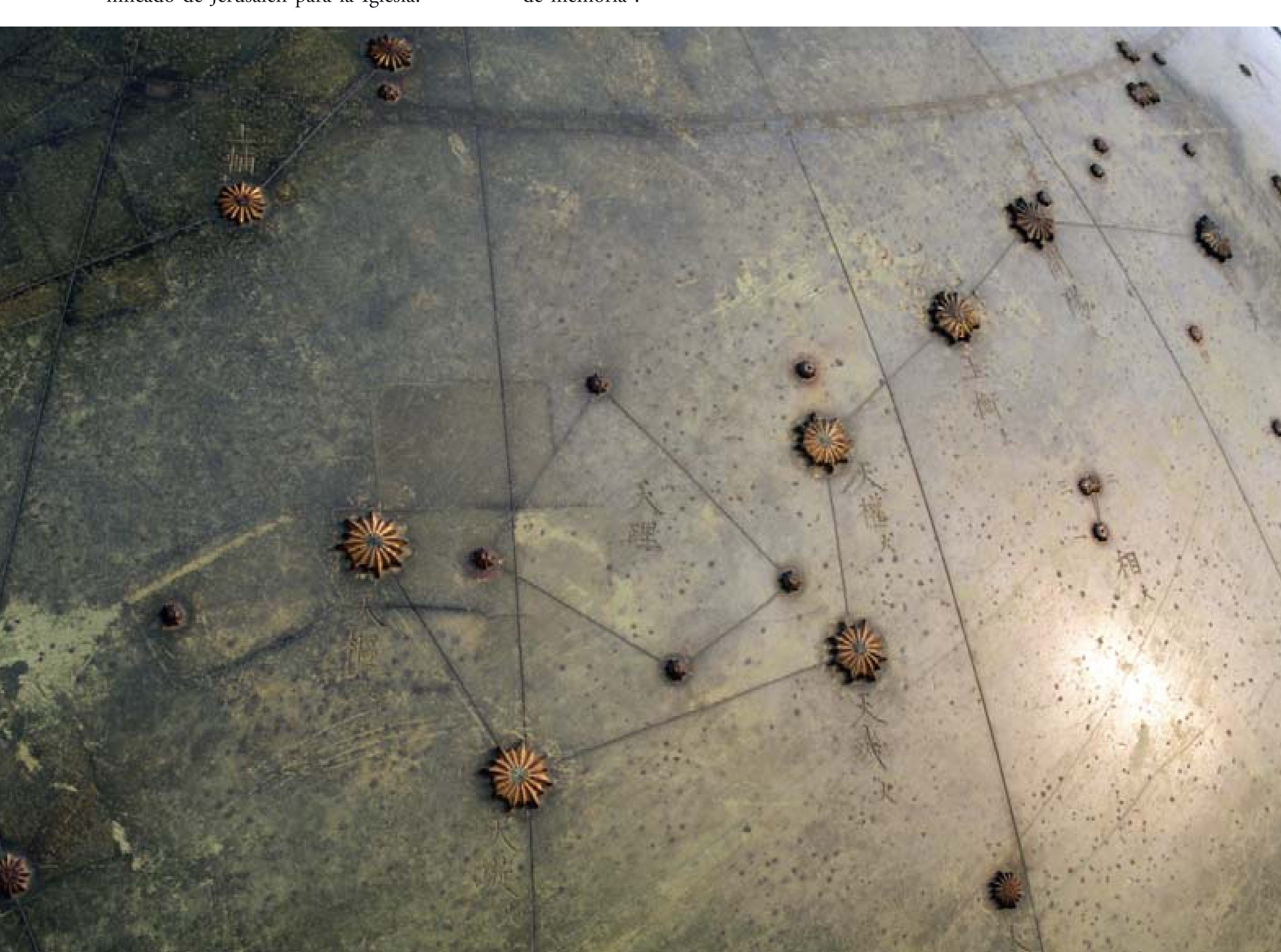
Ricci instruyó a jóvenes chinos en la técnica del "palacio de la memoria", en palabras de Jonathan Spence, experto en historia china de la Universidad de Yale. Consiste en imaginarse edificios reales o ficticios en cuyas estancias se depositan informaciones según reglas establecidas. Estas estancias se unen mentalmente mediante "accesos", vestíbulos y escaleras que no son más que vínculos lógicos, emocionales o asociativos. Así se erigían edificios del saber, espacios o paisajes que almacenaban las informaciones y las organizaban.

Escuela superior del arte mnemotécnico

Ricci intentó durante muchos años acercar esta función de su mapa a los chinos convertidos a la fe cristiana; también a los visitantes con un interés científico. Que esto servía para la tarea misionera lo ponen de manifiesto los textos con informaciones religiosas que el sacerdote deslizaba. Explicaba, por ejemplo, que Italia meridional y central eran los territorios del Papa, "quien vive en celibato y se dedica exclusivamente a la religión católica", y el significado de Jerusalén para la Iglesia.

El misionero pensaba que esta mnemotécnica, o arte de la memoria, y los conocimientos matemáticos y alquímicos ayudarían a que la misión jesuítica se propagase. Esta creencia casaba con el ideal europeo de una estructura del saber donde la memorización, combinada con otras habilidades numéricas y el mundo secreto de la alquimia, otorgaba a los adeptos, junto con la religión, el poder de influir en su destino. Hay que decir aquí que el jesuita se encontró con unos oídos predispuestos, ya que el arte de la memorización pertenecía a la instrucción clásica de los funcionarios y era aprendida desde la niñez. Algunos clásicos, como el *Libro de los ritos* (Liji), el *Libro de las transformaciones* (Yijing) y las charlas de Confucio (Lunyu), proporcionaban el punto de referencia de la escolarización memorística.

El sistema de los jesuitas se basaba en el canon bíblico de Occidente. Por ello no es de extrañar que incluso los sabios de más alto rango afirmaran despectivamente que el "sistema de Ricci no constituía ninguna ayuda, ya que presuponía *per se* una gran capacidad de memoria".



Sus sucesores no tendrían ningún interés en rectificar las consideraciones de los chinos: la mnemotécnica acabó perdiendo su importancia en Europa.

Malentendidos astronómicos

El filósofo Francis Bacon (1561-1626) también calificó aquella mnemotécnica de farragosa y excesiva; no veía ninguna ventaja en ligar el saber a una técnica gráfica. Entonces, ¿por qué conserva Ricci la fama de haber sido un intermediario del saber entre Occidente y Oriente? Con él y con la misión de los jesuitas en China empezó un intercambio de pensamiento entre las dos culturas hasta entonces inexistente, Sin embargo, es notorio que la idea de misión permaneció en muy primer término y condujo a muchos malentendidos, que duraron siglos, en el terreno del pensamiento científico natural. Así fue sobre todo en lo tocante a la transmisión de saberes en los pocos campos en los que, hasta hace poco, se creía que se tuvo éxito: la astronomía y las matemáticas.



4. EL EMPERADOR KANGXI (1654-1722) empleó al jesuita Ferdinand Verbiest como astrónomo, cartógrafo y metalúrgico sin apenas contraprestaciones.

Ya en 1594, el ministro de ritos Wang Honghui, que a menudo había sido huésped de la misión de Zhaoqing, indicó a Ricci que en China se valoraba mucho la astronomía, ya que se consideraba que los eclipses de Sol y de Luna eran presagios importantes. Sólo quien podía predecirlos correctamente tenía como emperador la legitimación para reinar, en cuanto intermediario entre el Cielo y la Tierra. El cómputo del tiempo, que se basaba en la observación del cielo, también se incluía en esta categoría. Con todo, el calendario chino no se había puesto al día desde 1281, mientras que en Europa ya se había realizado la reforma gregoriana. Los jesuitas construyeron y regalaron relojes de sol, medidores mecánicos del tiempo e instrumentos astronómicos. Esto despertó la atención de la élite mucho más que la cartografía o la mnemotécnica. La idea fructificó, y en 1597 el emperador permitió a Matteo Ricci viajar a la capital, para saber más del arte de los extranjeros. La invasión de Corea por los japoneses creó, sin embargo, un clima hostil a los extranjeros y obligó a los jesuitas a huir. Cuando en 1601 establecieron finalmente su residencia en la capital, el misionero se puso como objetivo conseguir la entrada de los jesuitas en la oficina del calendario.

La gran oportunidad vino en 1629, 18 años después de la muerte de Matteo Ricci. Su alumno Xu Guangqi, que entre tanto había ocupado el influyente puesto de vicepresidente en el ministerio de los ritos, organizó un concurso entre astrónomos. Hizo calcular un eclipse de Sol según los métodos tradicionales de los chinos, que seguían los métodos de los musulmanes que se establecieron hacía tiempo en China, y según el de los europeos. El último resultó más exacto. Desde entonces, un grupo de jesuitas y de sabios chinos, bajo la dirección de Xu Guangqi, construyó instrumentos astronómicos y tradujo obras de filosofía natural y de matemáticas occidentales.

Inmigrantes eruditos

Lo que para los jesuitas debió de aparecer como una brecha en la muralla, no tuvo por el lado chino tanto valor. El reclutamiento de europeos no significó en absoluto el reconocimiento de un déficit, ya que el consultar a expertos extranjeros en el cómputo del calendario y en la observación de estrellas tenía una larga tradición. Durante la dinastía Tang (618-907) estos puestos eran del dominio de los astrónomos indios, y los soberanos mongoles de la dinastía Yuan (1271-1368) reclutaron para la tarea a persas y asiáticos centrales preferentemente. En comparación con estos empleados extranjeros, los jesuitas salían peor parados, ya que ofrecían su conocimiento sin obtener una contrapartida concreta. Por ejemplo, la dirección de un instituto de astronomía permaneció en las manos de musulmanes durante la dinastía Ming.

La situación mejoró para los jesuitas únicamente cuando la dinastía Qing tomó el poder

en toda la China, ya que los manchúes, ellos mismos extranjeros en China, querían legitimar sus pretensiones de poder lo antes posible por medio de un calendario exacto. Los jesuitas no sólo disponían del mayor conocimiento astronómico, sino que además se esperaba de ellos una mayor lealtad que de los sabios chinos. Esto permitió al padre Adam Schall von Bell (1591-1669) acceder en octubre de 1644 al influyente puesto de director de la oficina astronómica en la corte Qing.

Sin embargo, esta dinastía tampoco hizo muchas concesiones. Más bien explotó a aquellos extranjeros. Schall hubo de proporcionar también sus conocimientos occidentales para la fundición de cañones ligeros. Hasta el final de su vida, ese hombre dedicado a Dios produjo más de 500 cañones de cuarenta libras; publicó su saber en un tratado chino sobre "los fundamentos de la fabricación de armas de fuego". A pesar de ello, cuando Schall evangelizó por decreto a los subordinados de su oficina, le acusaron de espionaje, y en 1664 incluso de incompetencia científica. Los jesuitas y la mayoría de los conversos al Cristianismo fueron desterrados a Cantón.

El sucesor de Schall, el ya mencionado Ferdinand Verbiest, consiguió gracias a su saber astronómico un nuevo permiso de residencia en la Corte. De todos modos, tuvo que producir también cañones y armas de fuego de mano. Verbiest puso finalmente a los soberanos manchúes, desde el punto de vista cartográfico, al nivel más avanzado de Occidente. Fue además el único jesuita que consiguió acceder a las estancias más íntimas del emperador. Instruyó al joven emperador Kangxi (1654-1722, reinó a partir de 1661) en la geometría euclídea y en trigonometría esférica, agrimensura y astronomía.

El regente supo cómo utilizar a Verbiest en beneficio del estado sin darle nada a cambio. Le hizo montar prismas, perfeccionar sistemas de palancas, construir relojes de sol. A decir verdad, el misionero resultó ser sorprendentemente creativo. Calculó órbitas planetarias e inventó el primer vehículo movido por vapor. Los sabios chinos, sin embargo, ignoraron sus descubrimientos e inventos, ya que los consideraban simples juguetes para distraer a los soberanos.

Recelo frente a Euclides

Los experimentos alquímicos de Ricci tampoco despertaron al principio gran interés científico entre los chinos; más bien fueron considerados una curiosidad. Los científicos chinos disponían desde hacía tiempo de excelentes conocimientos en metalurgia, en la fabricación de papel y de seda, así como en la obtención de sal, en Europa desconocidos en gran medida. La porcelana china documentaba, además, una habilidad en la preparación de cerámica que a los alquimistas europeos de entonces les caía muy lejano.

No tardó mucho en fracasar la misión de los jesuitas con su principio de que había que intercambiar ciencia por fe, conforme a la idea prioritaria de misión. ¿Por qué tuvo, por ejemplo, la traducción de la "Geometría de Euclides" que hicieron Matteo Ricci y Xu Guangqi tan poca influencia en la matemática china? El sabio Mei Wending (1633-1721) describió el estilo de Euclides unos cincuenta años después de la primera publicación como "difuso y sobrecargado, con demasiados detalles innecesarios". Aún más dañina era su aseveración de que los autores "habían prescrito además una religión que no concordaba con nuestras tradiciones y costumbres". Cuanto más vinculaban los jesuitas sus conocimientos a la idea de misión y los utilizaban para ella, tanto más recelosos se tornaban los sabios chinos.

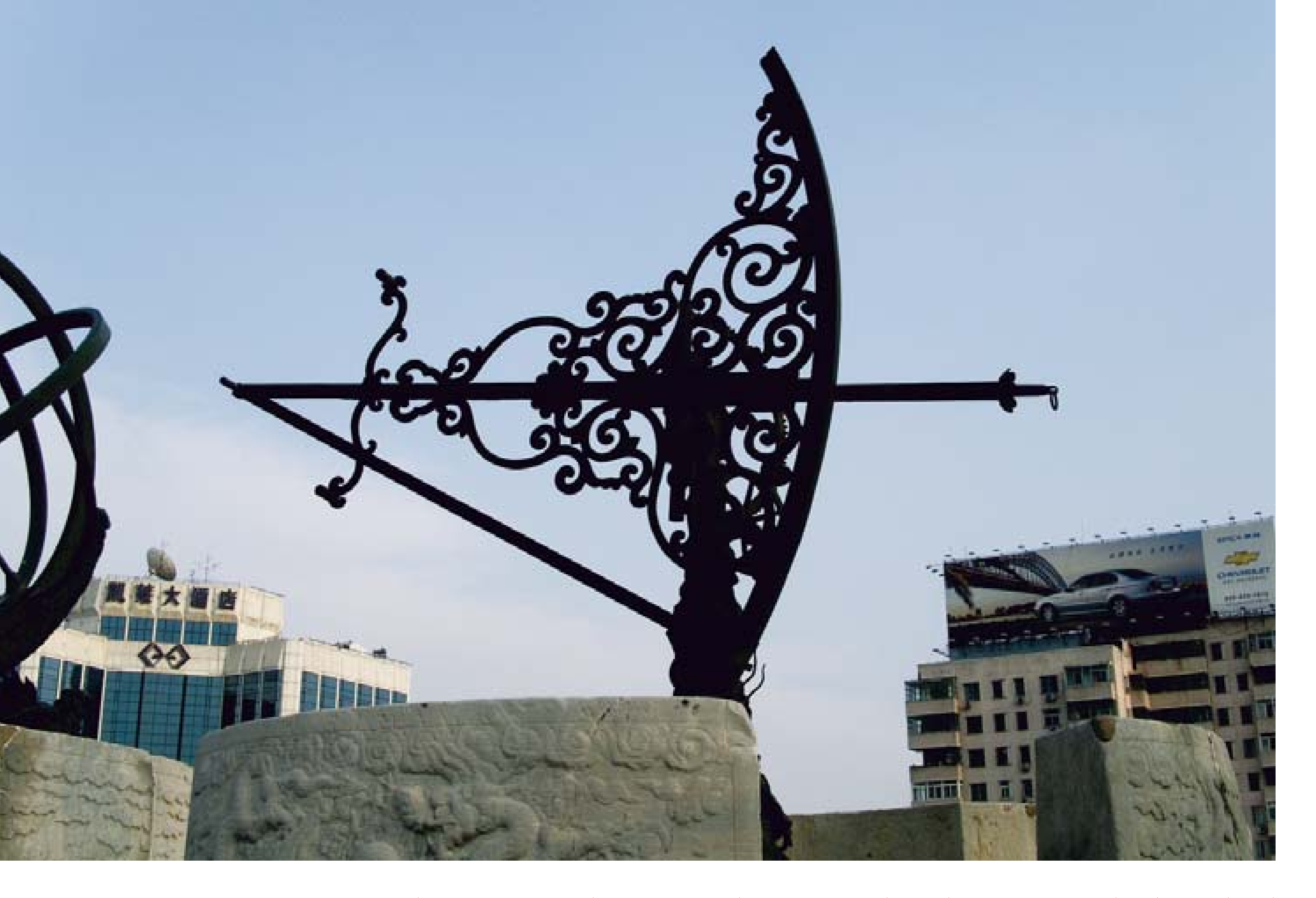
Jacques Gernet, sinólogo de la Universidad de París, cree que a los chinos les era totalmente extraña la idea de vincular los saberes sobre el mundo con la religión. Para ellos existía sólo un tiempo y una física, independientes de las creencias personales. Se puede decir que el principio de la transformación perpetua, con sus dos coordenadas extremas del Ying y el Yang, describía el mundo, desde el punto de vista chino, de modo neutro en cuanto a la religión se refiere. Los jesuitas, por el contrario, supeditaron la ciencia al dogma religioso. Paradójicamente, la Orden estaba ya preparada para asumir los cálculos de Nicolás Copérnico (1473-1543) o de Galileo Galilei y utilizarlos para confeccionar el calendario, pero al mismo tiempo rechazaba las consecuencias de una concepción heliocéntrica del mundo por motivos religiosos. Instruían a los astrónomos chinos en el cálculo de las órbitas planetarias, pero en cambio no decían que esas fórmulas se basaban en el supuesto de que el Sol, y no la Tierra, ocupaba el centro. Los jesuitas encontraban tanta más resistencia cuanto más firmemente ligaban las ideas religiosas al intercambio científico o pretendían que en las fórmulas matemáticas se manifestaba un principio divino, es decir, cristiano.

Falsas connotaciones

El intento de Matteo Ricci de asimilar las dos culturas fue con toda seguridad problemático. Si hubiera confrontado los matemáticos chinos con los términos griegos y los latinos, en vez de traducirlos a la lengua del país, se habrían evitado muchos malentendidos. Desde

La autora

Dagmar Schäfer es sinóloga e historiadora de la ciencia. Estudió en la Universidad de Würzburg. Investigó hasta 2006 en la de Pennsylvania y dirige actualmente un grupo de trabajo sobre "Tradiciones culturales del desarrollo técnico en China desde el siglo XV hasta el XIX" en el Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia, en Berlín.



5. ENTRE LOS INSTRUMENTOS DE BRONCE del observatorio se encontraba este sextante. Servía para medir ángulos verticales y horizontales y horizontales, y entre dos estrellas.

el principio, Ricci eligió términos chinos que tenían más de una acepción. La noción de axioma matemático, es decir, de hecho tomado como seguro, la tradujo mediante la palabra *gonglun*. El conocía bien su significado: "criterio común". Escogió este término pensando que una opinión común supone también un reconocimiento general. Pero se le escapó otra connotación: *gonglun* significa también "asunto discutido por la generalidad", es decir, lo contrario que unos hechos tomados como ciertos. No hay que extrañarse, pues, de que las generaciones siguientes utilizaran principalmente la matemática occidental sólo para mejorar la china, como en el importante campo tradicional de las conversiones de unidades y deformación de superficies. Con la asimilación selectiva y la acomodación cultural, se perdieron muchas cosas. Así, faltaba en ediciones posteriores de Euclides en chino la estructura general deductiva: en lugar de introducir fórmulas mediante construcciones geométricas, se trataba a éstas como objetos dados, casi como cantidades mensurables. Convenía al modo chino tradicional de representación, pero no aclaraba el nuevo.

Según el sinólogo Michael Lackner, de Erlangen, después de que los jesuitas tuvieran que abandonar China definitivamente en 1744, decayó la importación científica, hasta reducirse a pequeñas contribuciones testimoniales: informaciones que parecían chinas y no se podían relacionar ya con el todo occidental de donde procedían.

Con ello no sólo fracasó el tercer intento de establecer el cristianismo en China, sino que además los jesuitas contribuyeron decisivamente a que el Imperio y sus herederos rechazaran la ciencia occidental por ser incompatible con la tradición china. A las muchas decisiones de los misioneros que más tarde resultaron fatales, acompañó la obcecación de los jesuitas en considerar a China, a pesar de su alta producción de sal, su metalurgia, sus telares de seda, su sabiduría médica y sus conocimientos de filosofía natural, como una especie de país en vías de desarrollo.

Tampoco la misión británica de Macartney, que viajó a China en 1792 para lograr una apertura del comercio, consiguió mejores resultados. Los emisarios británicos llevaban en su equipaje un planetario, un telescopio, un barómetro y una réplica de una máquina de vapor, pensando en la fascinación que la ciencia occidental produciría sobre una "cultura atrasada". A ello el emperador chino contestó: "Nunca hemos valorado demasiado oscuros objetos, ni tenemos el más mínimo interés en lo que vuestro país tiene que ofrecer. Vuestra pretensión de conseguir el permiso de residencia en nuestra capital para un emisario vuestro no sólo es contraria a nuestras leyes, sino que tampoco representa ninguna ventaja para nuestro país".

Bibliografía complementaria

MATTEO RICCI: EUROPA AM HOFE DER MING. Dirigido por Filippo Mignini. Catálogo para la exposición del mismo nombre en el Museo de Cultura Asiática, Berlín. Ediciones Gabriele Mazzotta; Milán, 2005.

Fideos de mar

José Rico

Himanthalia elongata, un alga parda, predomina en las costas atlánticas de la Europa septentrional. Forma cinturones algales característicos en el nivel inferior del espacio intermareal, en roquedos moderadamente expuestos a la acción del oleaje. Especie típica de aguas templado-frías, medra en la costa norte de la península Ibérica: desde la zona central de Asturias hasta la costa norte de Portugal. Se asocia a la presencia de aguas más frías procedentes de afloramientos costeros.

Presenta un ciclo biológico bianual o pseudoperenne. Al año después de haberse fijado, a partir del otoño, las setas comienzan a producir una suerte de cintas, que corresponden a la parte reproductora de la planta. Allí se desarrollan los receptáculos, en donde se producen los gametos que se liberan al final del verano. Las cintas entran en la dieta humana de algunos países europeos; de ahí el nombre de fideos de mar que les dan en Francia y España.

2. La parte fértil (cintas) y la vegetativa (setas) entran en senescencia. Se desprenden de la roca y se acumulan durante el verano y el otoño en forma de arribazones.



1. El ciclo biológico se inicia con la llegada de reclutas que se fijan a la roca entre octubre y noviembre. Durante un año, se transforman lentamente en "setas", que aumentan el tamaño de su sombrero.

FOTOGRAFIAS DE JOSE RICO



3. Los cigotos que resultan de la fecundación se liberan y pasan al agua. Tras un breve período, se fijan de nuevo a la roca, reiniciando el ciclo.

Chris Wiggins: en el filo del código de la vida

Mediante la técnica del aprendizaje automático, Chris Wiggins pretende desarrollar modelos que predigan el comportamiento del genoma bajo cualquier circunstancia

Thania Benios

En el autobús que le llevaba del aeropuerto al Instituto Kavli de Física Teórica en Santa Bárbara (California), Chris Wiggins siguió el consejo de un colega y abrió una hoja de cálculo. Nada tenía que ver con la conferencia que iba a dictar sobre física de biopolímeros. En vez de eso, las filas y columnas de números que aparecieron en la pantalla representaban la actividad genética de la levadura en gemación (*Saccharomyces cerevisiae*). En particular, los números indicaban la cantidad de ARN mensajero (ARNm) expresado por los 6200 genes de la levadura en el transcurso de su ciclo reproductivo. "Nunca antes había visto nada parecido", rememora Wiggins de aquel día de 2002. ¿Cómo podía sacarse algo en claro de todos esos datos?

En vez de amilanarse ante esa cuestión, este especialista en matemática aplicada y física de 36 años, de la Universidad de Columbia, se puso manos a la obra. Ahora, seis años más tarde, dice haber encontrado la respuesta. Adentrándose en campos distintos del suyo, se sirvió de una técnica de la inteligencia artificial, el "aprendizaje automático", para reproducir, a partir de datos biológicos reales, la actividad conjunta de los genes en la síntesis de proteínas. Los ingenieros diseñaron esas herramientas a finales de los años cincuenta del siglo pasado para obtener una salida (*output*) a partir de una entrada conocida (*input*). Wiggins y sus colaboradores han aplicado el aprendizaje automático a las ciencias de la naturaleza y lo han refinado; no sólo sirve para conocer la salida en función de la entrada, sino también para desentrañar la "caja negra" que transforma la una en la otra: el sistema de regulación génica.

Ese trabajo tomó impulso a finales de los años noventa, cuando las técnicas de alto rendimiento generaron más perfiles de expresión de ARNm y de ADN que nunca. En la opinión de Wiggins, ello abrió un nuevo enfoque sobre los fenómenos biológicos. Entre esas técnicas, resultaron clave las *micromatrices* de ADN, conjuntos de celdillas mínimas que proporcionan una visión panorámica de la actividad de los genes y de su nivel de expresión en cualquier tipo de célula, de forma simultánea y bajo diversas condiciones. A pesar del ruido que rodea a los datos, incompletos, los biólogos averiguaban qué genes se hallaban activos o inactivos en distintas células y determinaban la colección de proteínas que suscita los rasgos característicos de una célula, sea sana o mórbida.

Mas para predecir tal actividad génica debemos antes descubrir las reglas fundamentales que la gobiernan. Según Harmen Bussemaker, profesor de biología en la Universidad de Columbia, con el tiempo, esas reglas han quedado fijadas en las células. La evolución ha conservado lo bueno.

Para desentrañar esas reglas, los científicos necesitaban estadísticas que les permitieran deducir la interacción entre los genes y las proteínas que los regulan, y describir luego matemáticamente la estructura que subyace bajo este entramado, el patrón dinámico de actividad génica y proteínica a lo largo del tiempo. Pero los físicos que no trabajan con partículas (o con planetas, para el caso) consideraban que la estadística era poco menos que una herejía. El físico británico Ernest Rutherford dijo una vez que "si tu experimento necesita estadísticas, es que deberías haberlo hecho mejor".

Wiggins explica que al trabajar con micromatrices, el experimento no lo haces tú. Y la biología no te proporciona un modelo para comprender los datos. Es más, las piezas de que están hechos el ADN, el ARN y las proteínas se componen a su vez de piezas que se ensamblan de múlti-



BRIAN MARANAN PINEDA

CHRIS WIGGINS

DEVORADOR DE NUMEROS: Utiliza un enfoque estadístico para predecir si los genes de un organismo incrementan o disminuyen la síntesis de proteínas (es decir, el comportamiento de la red de regulación génica) y sacar a la luz la lógica subyacente.

HERRAMIENTA CLAVE: Un algoritmo de aprendizaje automático que barre los datos de las micromatrices e identifica las conexiones importantes entre las secuencias de ADN y las proteínas que las regulan.

ples formas; y su actividad es gobernada por reglas levemente distintas, lo cual dificulta —si bien no imposibilita— reducir a leyes fundamentales sus patrones de interacción. Algunos genes y proteínas ni siquiera se conocen. “Tratamos de encontrar algo convincente sobre el mundo natural en un contexto en el que no sabemos gran cosa”, dice William Bialek, de la Universidad de Princeton. “Por fuerza somos agnósticos”.

Wiggins cree que muchos algoritmos de aprendizaje automático resultan fructíferos precisamente en ese contexto. Cuando se trabaja con tantas variables, el aprendizaje automático deja que sean los datos mismos quienes decidan qué es lo que vale la pena mirar.

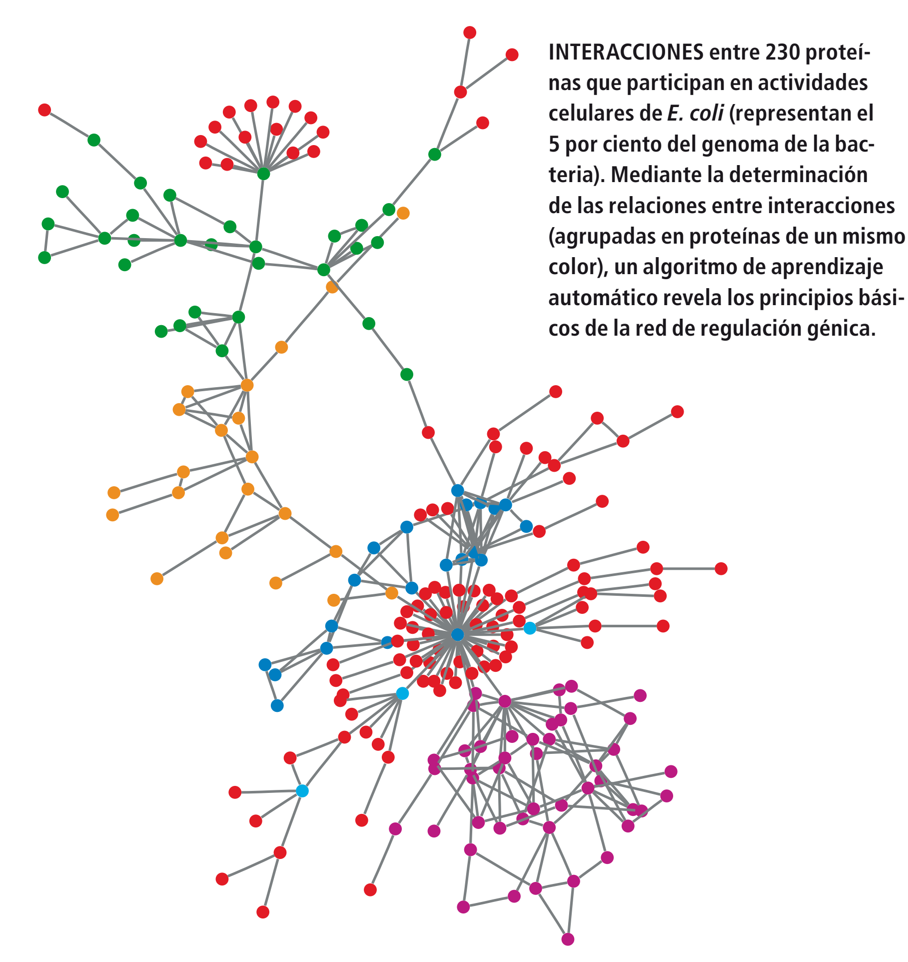
En el Instituto Kavli, Wiggins comenzó a construir un modelo de una red de regulación génica en la levadura, es decir, el conjunto de reglas por las cuales los genes y los reguladores deciden, de forma colectiva, cuán vigorosamente se transcribe el ADN en ARNm. A la vez que trabajaba con distintos algoritmos, comenzó a asistir a los seminarios sobre regulación génica organizados por Christina Leslie, quien por entonces dirigía el grupo de biología computacional de la Universidad de Columbia. Leslie sugirió emplear una herramienta específica del aprendizaje automático: un “clasificador”. Supongamos que el algoritmo debe discriminar entre fotografías en las que aparezca una bicicleta y las que no. Un clasificador revisa unas muestras etiquetadas y mide todo lo que puede en ellas; poco a poco, aprende las reglas de decisión que gobiernan la clasificación. A partir de esas reglas, el algoritmo genera un modelo que determina si en una fotografía nueva aparecen bicicletas. Aplicado a las redes de regulación génica, el aprendizaje consiste en predecir si los genes incrementan o disminuyen su actividad sintetizadora de proteínas.

El algoritmo que Wiggins y Leslie comenzaron a componer en otoño de 2002 lo entrenaron con secuencias de ADN y niveles de ARNm de reguladores expresados en una gama de condiciones de la levadura: cuando estaba fría, caliente, sin nutrientes, etcétera. En concreto, ese algoritmo, llamado MEDUSA (de Discriminación de Motivos Elementales Utilizando Aglomeración de Secuencias, en inglés), busca todas las parejas posibles de un conjunto de secuencias promotoras de ADN (motivos) y reguladores. Luego, del mismo modo que un niño relaciona una lista de palabras con sus definiciones mediante el trazado de líneas entre ambas, MEDUSA encuentra los emparejamientos que mejor hacen encajar el modelo con los datos experimentales. A esos enlaces se les denomina aristas. Cada vez que MEDUSA encuentra una pareja, actualiza el modelo mediante la adición de una regla que guía la búsqueda de una nueva relación. El algoritmo determina entonces la robustez de cada emparejamiento atendiendo al grado de mejora del modelo que introduce la nueva regla. La jerarquía de números permite determinar qué emparejamientos revisten mayor importancia y el modo en que éstos influyen, de forma global, en la actividad de cada uno de los 6200 genes de la levadura. Si se añaden esas relaciones de una en una, MEDUSA predice cuáles son los genes que intensifican la producción de ARN y cuáles la frenan; asimismo, revela los mecanismos colectivos que coordinan la lógica transcripcional de un organismo.

Ahora, el grupo de Wiggins puede ir mucho más allá de la levadura. Hace poco han demostrado que MEDUSA construye precisos modelos predictivos de las redes de regulación génica en gusanos y en algunos linajes celulares, incluidos los linfocitos humanos. En un linaje celular canceroso, se determinó cuáles eran los genes que potenciaban su actividad cuando deberían haberla disminuido, y viceversa. La meta final, sin embargo, es comprender su actividad coordinada e inferir, mediante la estadística, qué interacciones regulador-gen resultan en una célula enferma.

Aunque MEDUSA aporta predicciones exactas a partir de datos de prueba, seguimos sin saber si reproduce con fidelidad las redes biológicas reales. Para ello, cada conexión debería comprobarse experimentalmente. Tampoco está clara la fiabilidad de las micromatrices a la hora de medir los niveles de expresión. Además, el aprendizaje automático requiere que los investigadores formulen hipótesis *ad hoc*, que podrían estar sesgadas en favor de sus resultados. “Cualquier correlación en los datos podría ser pura casualidad”, señala Yoav Freund, de la Universidad de San Diego, autor de los algoritmos de aprendizaje de MEDUSA.

Para atajar esas limitaciones, los expertos tendrán que continuar combinando distintas ramas del saber y adoptar métodos diversos.



INTERACCIONES entre 230 proteínas que participan en actividades celulares de *E. coli* (representan el 5 por ciento del genoma de la bacteria). Mediante la determinación de las relaciones entre interacciones (agrupadas en proteínas de un mismo color), un algoritmo de aprendizaje automático revela los principios básicos de la red de regulación génica.

JAKE HOFMANN *Universidad de Columbia*

REGLAS



Gracias a un revolucionario tipo de luz láser, el peine de frecuencias ópticas, se construye una clase más precisa de relojes atómicos, entre muchas otras aplicaciones

En un abrir y cerrar de ojos, una onda de la luz visible realiza mil billones (10^{15}) de oscilaciones o ciclos. Semejante cifra ofrece grandes oportunidades y presenta una dificultad. Por el lado bueno, propicia numerosas aplicaciones, dentro y fuera de los laboratorios. Sin esa característica de la luz no mediríamos frecuencias y tiempos con muy alta precisión: gracias a ella se han podido efectuar algunas de las mejores comprobaciones de las leyes de la naturaleza; y sólo gracias a ella tenemos, por ejemplo, los sistemas GPS. La dificultad estriba en la imposibilidad de manipular la luz con las técnicas que valen para ondas electromagnéticas de frecuencias mucho más bajas, como es el caso de las microondas.

Ahora, gracias a un decenio de avances revolucionarios en la física del láser, se tienen a mano técnicas que van a desbloquear el potencial que las altas frecuencias de la luz visible impedían realizar. En particular, se han creado herramientas que explotan un tipo de luz láser que recibe el nombre de "peine de frecuencias ópticas". Como si se tratara de una regla de luz con decenas o centenares de miles de "marcas" muy juntas, un peine de frecuencias ópticas proporciona mediciones precisas de la luz. Podría servir de puente que salvase el enorme intervalo de frecuencias que va de las microondas a la luz visible: gracias al peine óptico, mediciones exactas de las microondas producen datos igualmente cabales y relativos a la luz visible.

Se avecinan miríadas de aplicaciones. Los peines ópticos harán posible una nueva generación de relojes atómicos más precisos, detectores químicos ultrasensibles y medios para controlar con láser reacciones químicas. Los peines podrían dar un gran impulso a la sensibilidad y el alcance del lidar (acrónimo en inglés de "detección y medición de distancias por medio de luz"), y aumentar mucho el número de señales que viajan por las fibras ópticas.

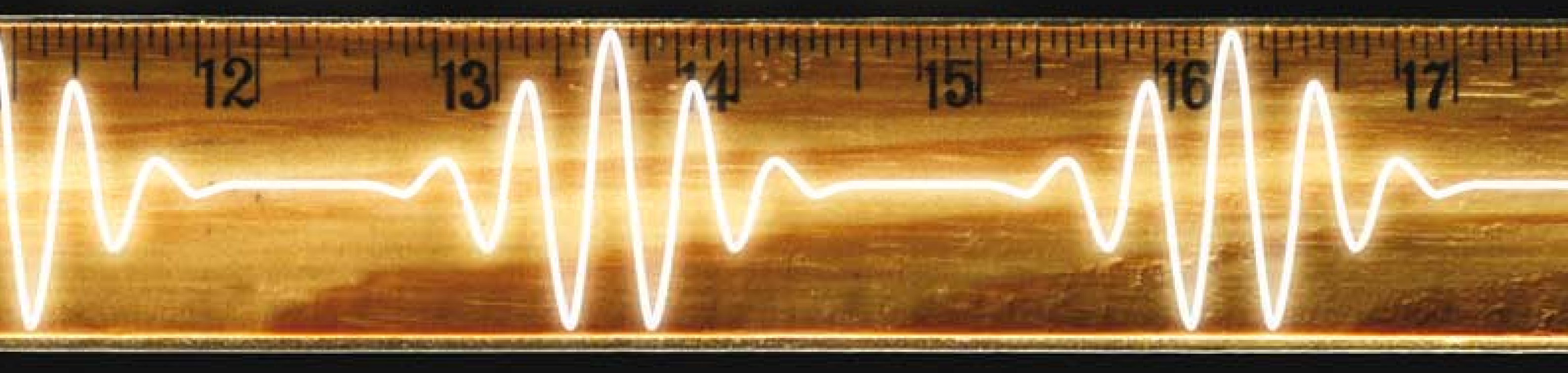
Los peines simplifican la tarea de medir frecuencias ópticas con muy alta precisión. Para llevar a cabo una medición así en el siglo XX, un equipo de doctores tenía que encargarse de salas enteras llenas de láseres de frecuencia única. Hoy, gracias a los peines de frecuencias ópticas, un estudiante de doctorado puede lograr resultados similares con un solo aparato. Los nuevos relojes atómicos ópticos se beneficiarán también de esta simplificación. Igual que el péndulo del reloj de pared lleva engranajes que captan sus oscilaciones y hacen girar las manecillas, un reloj atómico óptico cuenta las oscilaciones de la luz y las

CONCEPTOS BASICOS

- Un nuevo tipo de luz láser, el peine de frecuencias ópticas, sirve para medir frecuencias de luz e intervalos de tiempo con mayor precisión y facilidad que nunca.
- El peine consta de un tren de pulsos láser ultracortos uniformemente espaciados; su espectro presenta decenas de miles de "púas".
- Las aplicaciones incluyen un reloj atómico más preciso, detectores químicos ultrasensibles, control por láser de reacciones químicas, telecomunicaciones de más alta capacidad por medio de fibras ópticas y una mejora del lidar (el "radar láser").

DAVID EMMITE

DE LUZ



Steven Cundiff, Jun Ye y John Hall

convierte en una señal electrónica útil con un peine de frecuencias ópticas. En 2007 se superó la precisión de los relojes atómicos de cesio, que habían sido los mejores durante décadas, gracias a los peines.

En algunos aspectos, el cambio de situación debido a los peines ópticos recuerda el salto adelante que se produjo con la invención del osciloscopio, hará unos cien años. Este dispositivo anunció la edad moderna de la electrónica al permitir que las señales se mostraran directamente, lo que facilitó el desarrollo de los aparatos electrónicos, de la televisión al iPhone. La luz, sin embargo, oscila 10.000 veces más deprisa que los osciloscopios disponibles más rápidos. Los peines ópticos ofrecen ya un medio de exhibir la forma de las ondas de luz.

Las aplicaciones de los peines de frecuencias ópticas requieren un control exquisito de la luz en un amplio espectro de frecuencias. Semejante grado de control ha sido posible con las ondas de radio desde hace mucho tiempo, pero sólo ahora lo es con la luz. Una analogía musical ayudará a comprender el nivel de control necesario. Antes del desarrollo de los peines, los láseres generaban luz de un solo color, una sola nota óptica, digamos, como un violín de una sola cuerda y sin diapasón que no diese más que una nota (ignórese por el momento que las notas musicales de un instrumento real son mucho más ricas que una frecuencia pura). Tocar aunque fuera una pieza simple requeriría muchos violines muy bien afinados. Cada violín exigiría su propio músico, al igual que cada láser de frecuencia única requiere de su operador.

En cambio, un operador puede usar un peine óptico para cubrir todo el espectro óptico, no como un pianista con su piano, sino como el teclista de un sintetizador electrónico programado para imitar cualquier instrumento musical o hasta una orquesta entera. Los peines ejecutan sinfonías de cientos de miles de notas ópticas simultáneas.

Descripción de un peine

Los peines de frecuencias ópticas son generados por láseres de modos acoplados, que crean pulsos de luz ultracortos. Para entender las características de tales pulsos, imaginémonos la onda de luz de los láseres normales, los de onda continua. Idealmente, consistiría en una interminable corriente de oscilaciones regulares (que representan el campo eléctrico de la onda luminosa), donde cada cresta y cada valle tendrían la misma amplitud e irían llegando con un ritmo invariable. Un pulso de un láser

1. PULSOS DE LASER pueden formar una especie de regla de luz con la que se miden con exquisita precisión las frecuencias de otros láseres.

APLICACIONES DE LOS PEINES OPTICOS

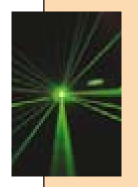


RELOJES ATOMICOS OPTICOS

Son los relojes más exactos y precisos que jamás se hayan construido. Ya han superado los sistemas basados en microondas, que desde 1967 eran los relojes patrón. Desempeñan un papel central en la navegación espacial, en las comunicaciones entre satélites, en comprobaciones muy sensibles de la física fundamental y en otras mediciones.

SENSORES QUIMICOS

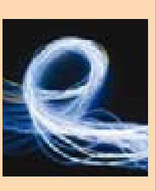
Se han diseñado detectores químicos ultrasensibles basados en peines ópticos; en la actualidad se están desarrollando prototipos de instrumentos comerciales. Los sensores basados en peines permitirán a los encargados de la seguridad identificar rápidamente explosivos o patógenos peligrosos. Los médicos diagnosticarán enfermedades mediante la detección de los productos químicos en la respiración de los pacientes.



SUPERLASERES

Con peines de frecuencia, se pueden juntar las salidas de muchos láseres para configurar una corriente de pulsos cuya luz sea tan organizada ("coherente") como la de un láser. En el futuro debería ser posible controlar el espectro electromagnético de manera coherente, desde las ondas de radio a los rayos X.

TELECOMUNICACIONES



Los peines ópticos aumentarán en varios órdenes de magnitud el número de señales que se pueden enviar por una sola fibra óptica. En lugar de un gran número de láseres individuales, sólo se necesitará un peine. La interferencia entre los canales se reducirá. Las comunicaciones seguras, en particular, se beneficiarán de la utilización de peines.



QUIMICA DE DISEÑO

Ya se está investigando cómo utilizar la luz coherente de los láseres para controlar las reacciones químicas. Los peines ópticos harán que este procedimiento resulte predecible y más fiable; serán fundamentales en el desarrollo de una nueva clase de reacciones químicas, las reacciones ultrafrías. Un día, los peines manipularán reacciones biológicas, mucho más complicadas que otras reacciones químicas.

LIDAR

El radar láser, o lidar (de "light detection and ranging", detección y medición de distancias por medio de la luz), utiliza luz láser para determinar la posición, la velocidad y las características de objetos distantes. Se espera que los peines de frecuencias ópticas, al permitir la generación de ondas con formas diseñadas especialmente, mejoren en varios órdenes de magnitud la sensibilidad y el alcance del lidar.

de modo acoplado, en cambio, es una serie corta de crestas y valles de onda cuya amplitud crece desde cero hasta un máximo, para caer de nuevo a cero. Los pulsos más cortos, de una duración de menos de 10 femtosegundos, contienen sólo unas pocas oscilaciones completas de la onda luminosa. La forma general del pulso —su completa subida y bajada— es su "envolvente". Se puede concebir el pulso como una onda continua (la "onda portadora") cuya amplitud se multiplica por la altura variable de la envolvente.

La onda portadora es luz de una frecuencia pura. Una gráfica de su espectro tendría un pico en esa frecuencia, indicando así la presencia de sólo esa frecuencia. Se podría esperar que el pulso que se está imaginando también consistiría sólo en luz de esa frecuencia —después de todo, no es más que la onda portadora de frecuencia única con sus amplitudes cambiadas—, pero no es así como funcionan las ondas y los espectros. Por el contrario, el pulso se compone de luz de muchas frecuencias que viajan juntas. Las frecuencias forman una banda pequeña y continua, centrada en la frecuencia portadora. Cuanto más corto sea el pulso, más amplio será el abanico de frecuencias.

Dos características adicionales de los pulsos emitidos por los láseres de modo acoplado son claves para el desarrollo de los peines de frecuencias ópticas. En primer lugar, desplazando un poco la envolvente con respecto a la onda portadora se producen pulsos ligeramente diferentes. El pico de la envolvente del pulso puede coincidir con una cresta de la portadora, pero puede también estar corrido a cualquier otra etapa de la oscilación. La cantidad de corrimiento recibe el nombre de fase del pulso.

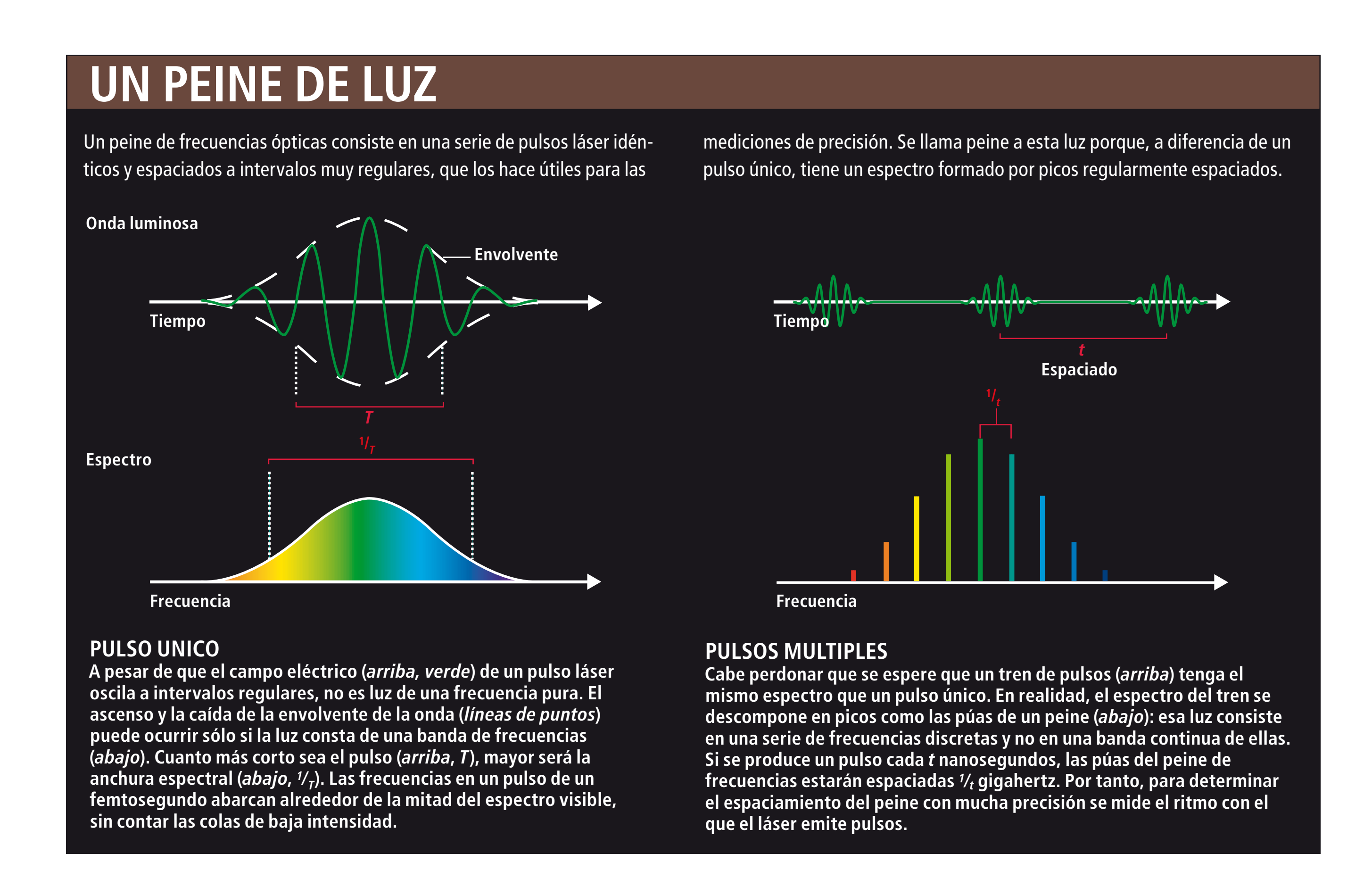
En segundo lugar, los láseres de modo acoplado emiten trenes de pulsos a un ritmo muy regular, llamado "ritmo de repetición". El espectro de frecuencia de un tren de pulsos semejante no dibuja un abanico continuo a cada lado de la frecuencia portadora, sino que se descompone en muchas frecuencias discretas. Representado de manera gráfica, el espectro se parece a las púas de un peine espaciadas conforme al ritmo de repetición del láser.

Un ritmo de repetición típico es de alrededor de un gigahertz (mil millones de ciclos por segundo), algo más lento que los procesadores de un ordenador actual. Un peine óptico que abarcase el espectro visible tendría 400.000 púas, si estuviesen espaciadas un gigahertz. Se pueden medir ritmos de repetición en el rango de los gigahertz (el de las microondas), con mucha precisión, por medio de fotodiodos de alta velocidad, que detectan cada pulso por separado; un peine óptico parecería catapultar esa precisión hasta las longitudes de onda visibles. ¿Por qué no usar las púas del peine de frecuencias como puntos de referencia con los que medir?

Sin embargo, hay trampa. Tiene que ver con la fase. Todo está bien si la fase de cada pulso del tren es exactamente la misma, porque en dicho caso las púas del peine caerán precisamente en múltiplos enteros del ritmo de repetición. Por lo tanto, se sabrían las posiciones de las púas una vez se hubiera medido el ritmo de repetición del láser.

Pero suele suceder que la fase cambie de un pulso al siguiente en alguna cantidad fija e impredecible. En ese caso, las púas del peine estarán desplazadas en frecuencia con respecto a los múltiplos enteros exactos del ritmo de repetición en una cantidad denominada fre-

SORA/CORBIS (*reloj*); EMILY HARRISON (*dibujo del reloj*); ROBERT KOHLHUBER *iStockPhoto* (*láser*); CONEY L. JAY *Getty Images* (*fibra óptica*); STEVE DIBBLEE *iStockPhoto* (*frasco*)



UN PEINE DE LUZ

Un peine de frecuencias ópticas consiste en una serie de pulsos láser idénticos y espaciados a intervalos muy regulares, que los hace útiles para las mediciones de precisión. Se llama peine a esta luz porque, a diferencia de un pulso único, tiene un espectro formado por picos regularmente espaciados.

PULSO UNICO

A pesar de que el campo eléctrico (*arriba, verde*) de un pulso láser oscila a intervalos regulares, no es luz de una frecuencia pura. El ascenso y la caída de la envolvente de la onda (*líneas de puntos*) puede ocurrir sólo si la luz consta de una banda de frecuencias (*abajo*). Cuanto más corto sea el pulso (*arriba*, *T*), mayor será la anchura espectral (*abajo*, $1/T$). Las frecuencias en un pulso de un femtosegundo abarcan alrededor de la mitad del espectro visible, sin contar las colas de baja intensidad.

PULSOS MULTIPLES

Cabe perdonar que se espere que un tren de pulsos (*arriba*) tenga el mismo espectro que un pulso único. En realidad, el espectro del tren se descompone en picos como las púas de un peine (*abajo*): esa luz consiste en una serie de frecuencias discretas y no en una banda continua de ellas. Si se produce un pulso cada *t* nanosegundos, las púas del peine de frecuencias estarán espaciadas $1/t$ gigahertz. Por tanto, para determinar el espaciamiento del peine con mucha precisión se mide el ritmo con el que el láser emite pulsos.

LISA APFELBACHER

cuencia de desplazamiento. Para conocer las frecuencias en que caen las púas del peine, hay que medir esa frecuencia de desplazamiento tan bien como el ritmo de repetición. La medida de la frecuencia de desplazamiento era una barrera para el progreso de los peines ópticos. Fue derribada en el año 2000. Hicieron falta los esfuerzos combinados de científicos de dos ramas de la investigación sobre el láser y el descubrimiento de un nuevo material.

Disciplinas convergentes

Durante la mayor parte de los últimos cuarenta años, quienes trabajaban en láseres ultrarrápidos —en la elaboración y utilización de los pulsos más cortos— desconocían la fase del pulso y el espectro teórico en forma de peine de una serie ideal de pulsos. Sus experimentos normalmente sólo dependían de la intensidad de los pulsos individuales, en cuyo caso la fase no tiene ningún efecto. Aunque los investigadores de los láseres ultrarrápidos a menudo medían el espectro de sus láseres de modo acoplado, rara vez lo hicieron con la suficiente resolución como para observar el espectro subyacente en forma de peine; así las líneas se entremezclaban y parecían una banda de frecuencias continua.

Las mediciones de alta resolución eran el dominio de los especialistas en espectroscopía de precisión y en metrología de frecuencias ópticas, donde los láseres de onda continua constituían la herramienta preferida. Tal como se ha mencionado anteriormente, un láser de onda continua envía una corriente constante de luz de una frecuencia precisa y su espectro aparece como un pico agudo. No muchos metrólogos eran conocedores del funcionamiento de los láseres de modo acoplado; y los que sí sabían de ellos, no creían que pudieran producir un espectro en forma de peine bien definido. Esperaban que las moderadas fluctuaciones en el tiempo o en la fase de los pulsos lo harían desaparecer.

Pero algunos investigadores, en particular Theodor W. Hänsch, del Instituto Max Planck de Optica Cuántica, en Garching, Alemania, confiaban en que los láseres de modo acoplado podrían un día ser un instrumento útil para la espectroscopía y la metrología de alta precisión. En el decenio de los setenta, época en que enseñaba en la Universidad de Stanford, utilizó láseres de tinte de modo acoplado (el medio en que en ellos se genera la luz láser es un tinte líquido) para realizar una serie de mediciones que establecieron los conceptos básicos del espectro en forma de peine y de su frecuencia de desplazamiento. Estas semillas estuvieron durmientes durante casi 20 años, hasta que las técnicas láser avanzaron lo suficiente para que fuera factible un mayor progreso de los peines.

Los autores

Steven Cundiff, Jun Ye y **John Hall** colaboran en el desarrollo y aplicación de peines de frecuencias ópticas de femtosegundos. Hall trabaja en medidas de precisión con láseres ultraestables de onda continua desde hace más de cuarenta años. En 2005 compartió el premio Nobel de física por sus investigaciones, entre ellas el desarrollo de las técnicas de peines. Ye comenzó su carrera hace unos 15 años con los láseres de onda continua ultraestables; desde el advenimiento de las técnicas de peines ha realizado importantes contribuciones a la ciencia ultrarrápida. Cundiff trabajó en ciencia ultrarrápida, principalmente en espectroscopía, aunque también en láseres de modo acoplado, antes de iniciar su colaboración con Hall y Ye, hace 10 años. Los tres pertenecen al JILA, un instituto conjunto del Instituto Nacional de Pesos y Medidas y la Universidad de Colorado en Boulder.



2. EL SONIDO COMBINADO de dos diapasones, uno de ellos un poco desafinado, produce el fenómeno de pulsación: el volumen del sonido oscila de fuerte a débil a un ritmo que es la frecuencia de pulsación, la diferencia de frecuencia de los dos diapasones. La pulsación de las ondas de luz se utiliza en muchas mediciones con láser, entre ellas las que emplean peines ópticos.



EL SEGUNDO PATRON

Los peines de frecuencias ópticas se utilizarán un día como patrones oficiales de tiempo.

- Hoy, el patrón se basa en la frecuencia de la radiación de microondas absorbida por átomos de cesio cuando se excitan entre dos estados concretos de energía "hiperfinos".
- Un segundo se define como el tiempo que tarda ese tipo de luz en oscilar precisamente 9.192.631.770 veces.
- Un patrón óptico usará luz emitida o absorbida por ciertos átomos o iones —aún hay que elegirlos— que vibrará con una frecuencia unas 60.000 veces la del patrón de cesio.

A finales de los años ochenta Peter Moulton, entonces en Schwartz Electro-Optics, de Concord, Massachusetts, utilizó el zafiro dopado con titanio para que sirviera de medio de ganancia de un láser con una gran anchura de banda. Wilson Sibbett, de la Universidad de St. Andrews, en Escocia, fue pionero en el uso de láseres de modo acoplado, a principios de los años noventa. En sólo unos años era ya corriente que los láseres de zafiro-titanio generasen pulsos de menos de 10 femtosegundos, sólo tres ciclos de luz [*véase* "Láser de pulsos ultracortos", por John-Mark Hopkins y Wilson Sibbett; Investigación y Ciencia, noviembre de 2000].

Al contar con estos láseres de zafiro-titanio, Hänsch desenterró su vieja idea de hacía 20 años: los peines de frecuencias ópticas. Realizó una serie de experimentos a finales de los años noventa, que demostraron el potencial latente de los láseres de modo acoplado. En uno de ellos, mostró que las líneas del peine en extremos opuestos del espectro de salida estaban bien definidas unas respecto a otras. Las púas del peine se asemejaban a marcas grabadas sobre una regla de acero, no a líneas dibujadas a lo largo de una goma elástica. En otro experimento, midió la frecuencia de una transición óptica en átomos de cesio (un cambio en su estado que absorbe o emite luz a una frecuencia precisa): recurrió a un láser de modo acoplado para cubrir la diferencia en frecuencia entre dos láseres de onda continua. Sus resultados nos movieron a emprender una investigación seria en este ámbito.

En JILA, instituto conjunto del Instituto Nacional de Pesos y Medidas (NIST) de Estados Unidos, y la Universidad de Colorado en Boulder, estábamos en una posición única para aprovechar los avances técnicos en dos ramas de la física del láser. JILA tiene una gran tradición en metrología de frecuencias ópticas y en espectroscopía de precisión, basada sobre todo en los ultraestables láseres de onda continua desarrollados a lo largo de 40 años por uno de los autores (Hall). En 1997, otro coautor (Cundiff) se sumó a JILA, aportando experiencia en láseres de modo acoplado y en técnicas de pulsos cortos. Se necesitaron muchas charlas de pasillo y de sobremesa antes de que superáramos nuestras diferencias conceptuales y decidiéramos unir nuestras fuerzas y las de un par de becarios posdoctorales: Scott Diddams, ahora en el NIST, y David Jones, hoy en la Universidad de Columbia Británica. El tercero de los firmantes (Ye) se incorporó al grupo en el verano de 1999, justo cuando la revolución comenzó en serio; pronto sería él quien desbrozase el camino hacia las aplicaciones de los nuevos peines de frecuencia.

Fibra mágica

Aunque los resultados de Hänsch eran impresionantes, sabíamos que perseguía ahorrarse la mayor parte de sus complejos aparatos. Las técnicas para lograr tamaña simplificación, sin embargo, requerían que un láser de modo acoplado produjera una enorme anchura de banda, preferiblemente una octava. (Una octava es un factor de dos en frecuencia, ya se trate de música, electrónica u óptica.) Aunque los láseres de zafiro-titanio producían impresionantes anchos de banda en aquel momento, no podían aún producir toda una octava de luz.

La pieza final del rompecabezas se puso en el Congreso de 1999 de Láseres y Electroóptica, donde Jinendra Ranka, de los Laboratorios Bell, presentó un trabajo sobre un nuevo tipo de fibra óptica, la fibra de microestructura. Contiene burbujas de aire de tamaño micrométrico que guían la luz a lo largo de su centro. Las propiedades de esta fibra permiten que pulsos de las frecuencias producidas por un láser de zafiro-titanio la recorran sin deformarse (al contrario de lo que ocurre en la fibra ordinaria y en la mayoría de otros medios ópticos). La falta de deformación mantiene alta la intensidad del pulso, lo que a su vez conduce a un mayor ensanchamiento espectral que en la fibra óptica ordinaria [*véase* "Láseres blancos", por Robert R. Alfano; Investigación y Ciencia, febrero de 2007].

Los resultados son visualmente impactantes. La salida de un láser de zafiro dopado con titanio está en el infrarrojo cercano, justo fuera de los límites de la visión humana. Aparece como un tenue color rojo para el ojo. El ensanchamiento espectral en la fibra con microestructura convierte este tenue rojo en longitudes de onda visibles: la fibra brilla con los sucesivos colores del arco iris.

En el otoño de 1999 nos las arreglamos para adquirir algo de esa fibra mágica. El momento no podía haber sido más perfecto. Acabábamos de terminar una serie de experimentos que demostraban que con un láser de zafiro-titanio podía cubrirse un intervalo casi tres veces más ancho que en la demostración inicial de Hänsch. Ya teníamos una configuración operativa en la que introducir la nueva fibra microestructurada. A las dos semanas de haber recibido el paquete urgente de los Laboratorios Bell, habíamos realizado un experimento que mostraba que la ampliación del espectro en la fibra microestructurada preservaba la estructura de frecuencias del peine del pulso láser original.

La importancia de un espectro que abarque una octava reside en lo siguiente: la frecuencia de desplazamiento puede medirse directamente como una frecuencia de radio. Caía así por tierra la barrera que se interponía ante el uso de peines para medir otras frecuencias. Hay varios métodos específicos para determinar la frecuencia de desplazamiento si se tiene un espectro que abarca una octava, muchos de los cuales provienen de las técnicas que se empleaban en la ingeniería de radio para medir frecuencias antes de que se generalizaran los contadores de alta velocidad. (Los contadores computan la cifra de oscilaciones que se producen en una onda de radio por unidad de tiempo, pero no pueden hacerlo con las mucho más altas frecuencias de la luz.) Describiremos ahora el más simple y versátil de los métodos para medir la frecuencia de desplazamiento, la autorreferencia.

La idea clave es que un espectro que abarca una octava permite comparar entre sí las frecuencias de dos líneas del peine en los extremos opuestos del espectro. Si la frecuencia de desplazamiento es cero, cada línea en el extremo de baja frecuencia del espectro tiene una línea correspondiente con el doble de su frecuencia en el extremo de alta frecuencia. Cualquier desviación de esta razón exacta resulta ser la frecuencia de desplazamiento. Este esquema de autorreferencia compara la luz del peine consigo misma, de donde el nombre.

La autorreferencia se lleva a cabo pasando parte de la luz láser a través de un cristal de

EL ANALIZADOR DE ALIENTO IDEAL

Los peines de frecuencias ópticas podrían detectar rápidamente en el aliento de una persona moléculas que señalaran diversas enfermedades:

METILAMINA: enfermedades hepáticas y renales

AMONIACO: Insuficiencia renal

ETANO: Algunas formas de cáncer

RAZONES DE ISOTOPOS DE CARBONO: Presencia de *Helicobacter pylori*

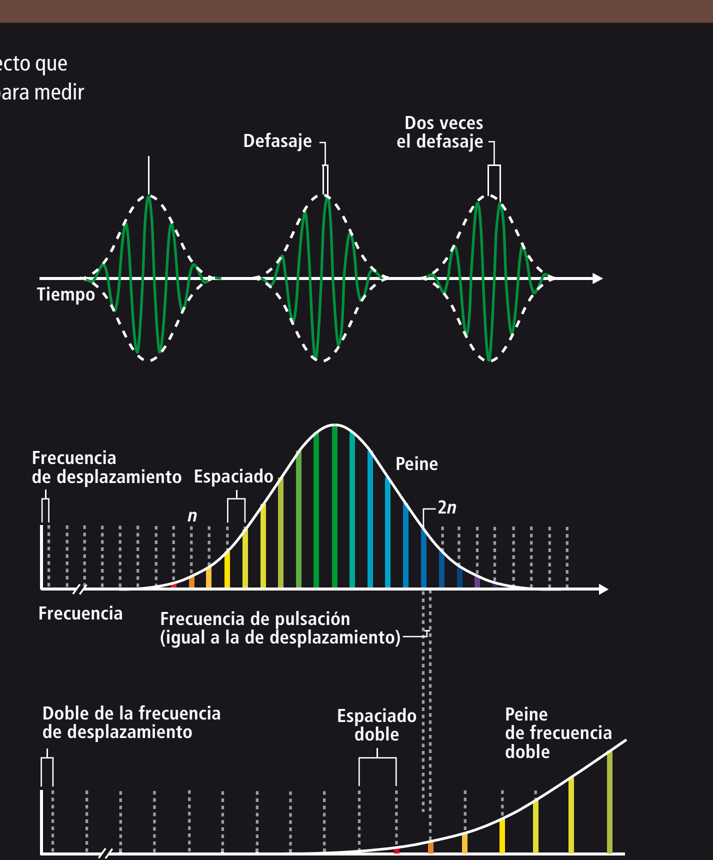
"CALIBRADO" DEL PEINE

Las púas del peine se descolocan ligeramente a causa de un sutil efecto que cambia sus frecuencias. Antes de que se puedan utilizar los peines para medir la luz de otro láser, primero habrá que corregir ese desplazamiento.

EL PROBLEMA
Con cada pulso sucesivo, cambia la alineación de las más altas amplitudes de la onda del pulso con relación al máximo de la envolvente; a este efecto se le llama corrimiento de fase.

COMO CAMBIA EL PEINE
El corrimiento de fase mueve la frecuencia óptica de las púas del peine en una cantidad denominada frecuencia de desplazamiento. Las púas del peine estarán en la frecuencia de desplazamiento, más múltiplos enteros del espaciado del peine. Una técnica, la autorreferencia, puede determinar las frecuencias de desplazamiento; para ello, el peine óptico ha de abarcar toda una octava, es decir, ha de cubrir todo el camino desde una frecuencia (*rojo, línea n*) al doble de esa frecuencia (*violeta, línea 2n*).

SOLUCION: COMPARAR PEINES
Se envía parte de la luz del peine a través de un cristal que produce líneas de peine al doble de la frecuencia original (y algunas otras líneas que no se muestran aquí). Debido a que las líneas de baja frecuencia cuya frecuencia se ha duplicado difieren de las líneas originales que ya eran de alta frecuencia en la frecuencia de desplazamiento, su combinación produce pulsaciones a justo dicha frecuencia, que se mide. Así, se sabe cuáles son las frecuencias exactas de sus líneas de peine.



LISA APFELBACHER

MENUDENCIAS DEL TIEMPO

Mientras se crean relojes basados en peines ópticos, los relojes atómicos tradicionales están ya al alcance de los científicos aficionados. En www.leapsecond.com/great2005, Tom Van Baak describe un viaje por carretera con su familia hasta el Monte Rainier, en el estado de Washington, con tres relojes atómicos para observar la dilatación del tiempo gravitacional (para su viaje, 22 nanosegundos) predicha por la relatividad general.



generación del segundo armónico, es decir, que dobla la frecuencia de la luz. Por lo tanto, se puede desdoblar la luz que forma el extremo de baja frecuencia del peine con un espejo que sólo refleje la luz de longitud de onda más larga y deje pasar las longitudes de onda más cortas, y luego la envíe a través del cristal duplicador y, por último, la dirija junto con la luz del extremo de frecuencia más alta del peine al mismo fotodetector. La luz combinada oscila en intensidad —“pulsa”— tal y como late el sonido combinado de una nota afinada y una desafinada. En ambos casos, la frecuencia de los pulsos o latidos es igual a la cantidad de desafinamiento.

En los pulsos de luz, los latidos adquieren la misma frecuencia que la frecuencia de desplazamiento del peine, porque cada línea doblada del extremo bajo estará desafinada en dicha cuantía respecto a una línea del extremo alto. En electrónica y en óptica, este procedimiento de combinar señales para obtener la frecuencia de pulsación se denomina detección heterodina.

Redefinición del tiempo

La sencillez de la metrología de frecuencias ópticas basada en los peines de frecuencias ópticas sólo puede apreciarse en comparación con las técnicas utilizadas antes de su desarrollo. En pocas palabras, consistían en cadenas de multiplicación de frecuencias en las que cada eslabón de la cadena constaba de un oscilador que tenía un múltiplo de la frecuencia del eslabón anterior. El primer eslabón de la cadena era un reloj de cesio, un tipo de reloj atómico que sirve de patrón internacional para definir el segundo. El reloj de cesio se basa en microondas de nueve gigahertz absorbidas por átomos de cesio. Para cubrir el trecho desde los nueve gigahertz hasta la frecuencia de la luz visible (un factor de por lo menos 40.000) se requería alrededor de una docena de etapas. Cada etapa utilizaba una técnica diferente; entre ellas, los láseres de luz visible.

El recorrido de las cadenas precisaba de muchos recursos y personal; sólo se construyeron algunos en todo el mundo; las mediciones se realizaron de forma intermitente. Además, en la práctica, los muchos eslabones de la cadena afectaban a la exactitud de la medida de la frecuencia óptica final.

Una vez que se inventaron los peines de frecuencias ópticas estabilizados, resultó mucho más fácil medir la frecuencia de un láser de onda continua con precisión. Como en una cadena de frecuencias, las mediciones de frecuencias basadas en peines debían todavía remitir a un reloj de cesio. Según vamos a ver ahora, la capacidad que un reloj de cesio tiene de medir frecuencias de hasta unos nueve gigahertz es todo lo que se necesita para determinar con un peine óptico la frecuencia de una línea de láser.

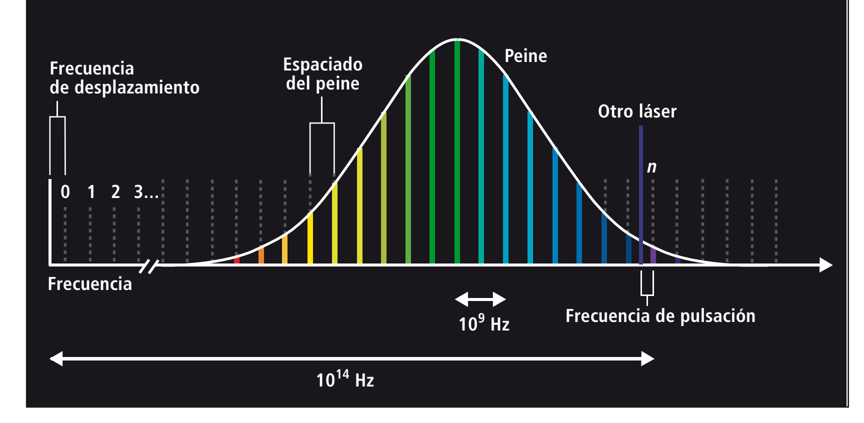
Se requieren varias piezas de información relativas al peine. En primer lugar, ha de medirse la frecuencia de desplazamiento del peine y el espaciamiento de sus líneas. A partir de esos dos números podemos calcular las frecuencias de todas las líneas del peine. A continuación, la luz láser desconocida se combina con la luz del peine para obtener la frecuencia de pulsación (es decir, la diferencia de frecuencia) entre aquella y la línea del peine más cercana.

Las tres frecuencias indicadas se encuentran en el rango de las microondas que pueden medirse con gran precisión con un reloj de cesio. Recuérdese que el espaciado de las líneas del peine es el mismo que el ritmo de repetición de los pulsos que producen el peine. La mayoría de los láseres de modo acoplado funcionan a un ritmo de repetición de 10 gigahertz o menos, lo que hace que la cantidad sea fácil de medir con el reloj de cesio. Lo mismo la frecuencia de desplazamiento que la frecuencia de pulsación se hallan dentro de los límites medibles con el reloj de cesio porque deben ser más pequeñas que el espaciado del peine.

Habrá que determinar otras dos piezas de datos: ¿De *cuál* de las líneas del peine se halla más cercana la luz láser desconocida y a *qué lado* de la línea cae? Los medidores comerciales de ondas pueden medir la frecuencia de una línea óptica dentro de menos de un gigahertz; basta para responder a estas dos preguntas.

MEDIDA DE LA LUZ

Para determinar la frecuencia de otro láser (*violeta*), los físicos combinan su luz con la luz de un peine óptico y miden la frecuencia de pulsación generada con la línea del peine más cercana (*n*). Pueden saber a qué púa del peine de dientes está más cerca el láser a partir del conocimiento aproximado de la frecuencia del láser obtenida por técnicas estándar, menos precisas. Así, mediante la medición de tres frecuencias en la gama del gigahertz, a saber, la frecuencia de desplazamiento, el espaciado del peine y la frecuencia de pulsación, se puede determinar la frecuencia de la luz con mucha exactitud en la gama de los 100 terahertz (10^{14} hertz).



DAVID EMMITE (*reloj de arena*); LISA APELBACHER (*gráfica*)

A falta de ese medidor de ondas, podemos variar sistemáticamente el ritmo de repetición y la frecuencia de desplazamiento para controlar cuál es la respuesta en el cambio de la frecuencia de pulsación. Con suficiente número de datos, identificaremos el lugar donde debe estar la línea.

La simplicidad de los peines ópticos no sólo ha aumentado la frecuencia con que se realizan estas mediciones tan precisas, sino que también, en gran medida, ha disminuido la incertidumbre de tales mediciones. Estos beneficios, algún día, pueden llevar a un patrón de tiempo óptico que sustituya al actual, basado en las microondas del cesio. Con esto en mente, un grupo del NIST, dirigido por James C. Bergquist, y otro del JILA, dirigido por Ye, han venido midiendo frecuencias con respecto a relojes que usan luz y un peine para producir la señal de salida. Ya las incertidumbres en las mediciones de los mejores de estos relojes son menores que las de las mediciones con los mejores patrones de cesio. Es un momento emocionante: muchos laboratorios de todo el mundo están a punto de construir patrones de frecuencias ópticos que pueden superar el que ha sido patrón de frecuencias durante muchos decenios. Las mediciones del grupo de Leo Hollberg, del NIST, así como de otros grupos, dan a entender que el límite intrínseco del peine óptico es un par de órdenes de magnitud mejor que la incertidumbre en las mediciones de frecuencias ópticas actuales.



3. EN EL RELOJ DE PARED, engranajes de distintos tamaños convertían el constante oscilar de su péndulo en los movimientos de sus manecillas, muy lentos y precisos. Los peines ópticos actúan de modo similar: hacen de "engranajes" que convierten las altas frecuencias de la luz óptica en frecuencias más bajas, mensurables; todo ello también para la medición de tiempos.

DAVID EMMITE

Más y más

La adopción de un estándar de tiempo óptico, sin embargo, sigue estando en un futuro de años. Los metrólogos deben primero evaluar cuidadosamente numerosas transiciones ópticas atómicas e iónicas antes de seleccionar la que parezca ser mejor como patrón.

Además de las muchas aplicaciones prácticas de los peines, la investigación fundamental sobre ellos continúa a ritmo acelerado en muchos frentes. Por ejemplo, el grupo de Ye puede usar un único peine para detectar con gran precisión muchas y diferentes transiciones de átomos y moléculas a la vez. Así, toda la gama de estados de energía de un átomo puede analizarse en una medición. Por otra parte, esta técnica es aplicable a la detección de numerosas trazas de especies en una muestra.

Los peines han tenido ya un gran impacto en el estudio de cómo responden átomos y moléculas a los intensos campos eléctricos de los pulsos de luz intensos y ultracortos. Gran parte de este trabajo ha sido dirigido por un colaborador de Hänsch, Ferenc Krausz, ahora en el Instituto Max Planck de Optica Cuántica. Entre otros logros, su grupo ha utilizado la respuesta de los electrones para medir el campo eléctrico de un pulso ultracorto de láser y representar la forma de la onda, de manera muy parecida a lo que se hace con una onda de frecuencia de radio en un osciloscopio. Krausz usó peines ópticos para estabilizar la fase de los pulsos a fin de tener una forma de onda que no cambia de un pulso a otro.

Otra área de investigación muy activa es el intento de llevar las técnicas de los peines a frecuencias más altas del espectro electromagnético. (Producir peines de menores frecuencias, incluso peines que funcionen desde las microondas hasta la luz visible, es sencillo.) En el año 2005 el grupo de Ye, en JILA, y el grupo de Hänsch, en Garching, generaron un preciso peine de frecuencias en el ultravioleta extremo (de frecuencia no muy por debajo de los rayos X). Se está usando ahora este peine ampliado para estudiar la estructura fina de los átomos y las moléculas con luz láser del ultravioleta extremo.

En el espacio de unos pocos años, los peines de frecuencias ópticas han pasado de problema de investigación estudiado por un pequeño número de científicos a instrumento para una amplia gama de aplicaciones e investigaciones fundamentales. Apenas hemos comenzado a explorar el potencial de estas reglas de luz.

Bibliografía complementaria

TIME MEASUREMENT AT THE MILLENNIUM. James C. Bergquist, Steven R. Jefferts y David J. Wineland en *Physics Today*, vol. 54, n.º 3, págs. 37-42; 2001.

OPTICAL FREQUENCY COMBS. National Institut of Standards and Technology. En la red en www.nist.gov/public_affairs/newsfromnist_frequency_combs.htm

FREQUENCY COMBS. Max Planck Institut for Quantum Optics. En la red en www.mpq.mpg.de/~haensch/comb/research/combs.html

SR LATTICE CLOCK AT 1×10^{-16} FRACTIONAL UNCERTAINTY BY REMOTE OPTICAL EVALUATION WITH A CA CLOCK. A. D. Ludlow et al. en *Science Express*; puesto en la red el 14 de febrero de 2008.

El grafeno, forma de carbono de reciente obtención, proporciona un rico sustrato a la física fundamental y promete múltiples aplicaciones



GRAFENO

CONCEPTOS BASICOS

- El grafeno es una lámina plana de carbono de un solo átomo de espesor que se apila junto con otras láminas iguales para formar el grafito: las "minas" de los lápices. Hasta hace muy poco no se consiguió aislar este material.
- Los cristales puros y perfectos de grafeno conducen la electricidad, a temperatura ambiente, más deprisa que cualquiera otra sustancia.
- Se piensa en productos basados en grafeno, entre ellos transistores ultraveloces. En él encuentran los físicos el material que les permite probar fenómenos que antes sólo se creían observables en agujeros negros y aceleradores de partículas.

Sorprende saber que el modesto lápiz, hoy corriente instrumento de escritura, un día fuera el artículo más apetecido de la técnica más avanzada, y que incluso se prohibiera exportarlo, por su valor estratégico militar. O quizás extrañe aún más que la marca trazada sobre el papel por una sencilla mina de lápiz contenga diminutas porciones del nuevo material más en boga hoy en la nanotecnia y en la física: el grafeno.

La palabra "grafeno" deriva de grafito, el material de las minas de los lápices: un tipo de carbono puro constituido por láminas de átomos planas apiladas. La estructura laminar del grafito se conoce hace siglos; es natural que los físicos y expertos en materiales hayan intentado dividir el material en las capas que lo integran, aunque sólo fuera por la sencilla elegancia de su descomposición geométrica. "Grafeno" es el nombre dado a una sola lámina: un plano de un átomo de espesor en el que se enlazan anillos hexagonales de átomos de carbono.

Durante muchos años, sin embargo, fracasaron todos los intentos de obtener grafeno. Al principio se insertaban a modo de cuñas diversas moléculas entre los planos atómicos de grafito, para separarlos; era la llamada exfoliación química. Es casi seguro que en alguna fase transitoria del proceso debían de desprenderse láminas de grafeno, pero nunca se las identificó como tales. Lo que finalmente se obtenía era una lechada de partículas de grafito, muy semejante a un hollín aguado. Se perdió el interés en la exfoliación química.

Poco después se ensayaron métodos más directos. Los cristales de grafito se dividían en obleas cada vez más delgadas, frotándolos o raspándolos contra otra superficie. Pese a su primitivismo, esta técnica, la división micromecánica, dio muy buenos resultados: se consiguió separar películas de grafito con menos de 100 planos atómicos. Hacia 1990, un equipo de físicos de la Escuela Técnica Superior de Renania-Westfalia en Aquisgrán habían aislado películas tan delgadas que alcanzaban la transparencia óptica.

En el decenio siguiente, uno de los autores (Kim), con la colaboración de Yuanbo Xhang, por entonces alumno de doctorado de la Uni-

André K. Geim y Philip Kim

versidad de Columbia, perfeccionó la división micromecánica y creó un “nanolápiz”. Al “escribir” con ese nanolápiz se obtenían láminas de grafito de espesor de unas decenas de capas atómicas. Con todo, el material resultante era grafito fino, no grafeno. Nadie esperaba que el grafeno pudiera existir.

El pronóstico pesimista quedó desmentido en 2004. Trabajaba entonces otro de los autores (Geim) con Kostya S. Novoselov y su grupo, de la Universidad de Manchester, en el estudio de métodos para adelgazar muestras de grafito. Los laboratorios empezaban entonces a probar con el hollín, pero el azar llevó a Geim y sus colaboradores a tratar los residuos de grafito exfoliado por medio de la fuerza bruta. Pegaron en una cinta adhesiva una escama de los residuos y plegaron sobre la escama el lado adherente de la cinta. Al abrir de nuevo la cinta, la escama se escindió en dos. Repitiendo el proceso se obtenían fragmentos cada vez más finos. Un meticuloso examen de las laminillas reveló que algunas sólo tenían un átomo de espesor. Aún fue más asombroso que estos pedacitos de grafeno recién identificados resultaran ser cristales de alta calidad, químicamente estables, incluso a temperatura ambiente.

El descubrimiento experimental del grafeno despertó el interés de investigadores de diversos países. No sólo es el material más delgado que se haya podido obtener; además es sumamente fuerte y rígido; en estado puro conduce los electrones a temperatura ambiente mejor que cualquiera otra sustancia. Actualmente, en laboratorios de todo el mundo se investiga a fondo para determinar si podrían construirse con él compuestos de gran resistencia, pantallas inteligentes, transistores ultrarrápidos y hasta computadores de punto cuántico.

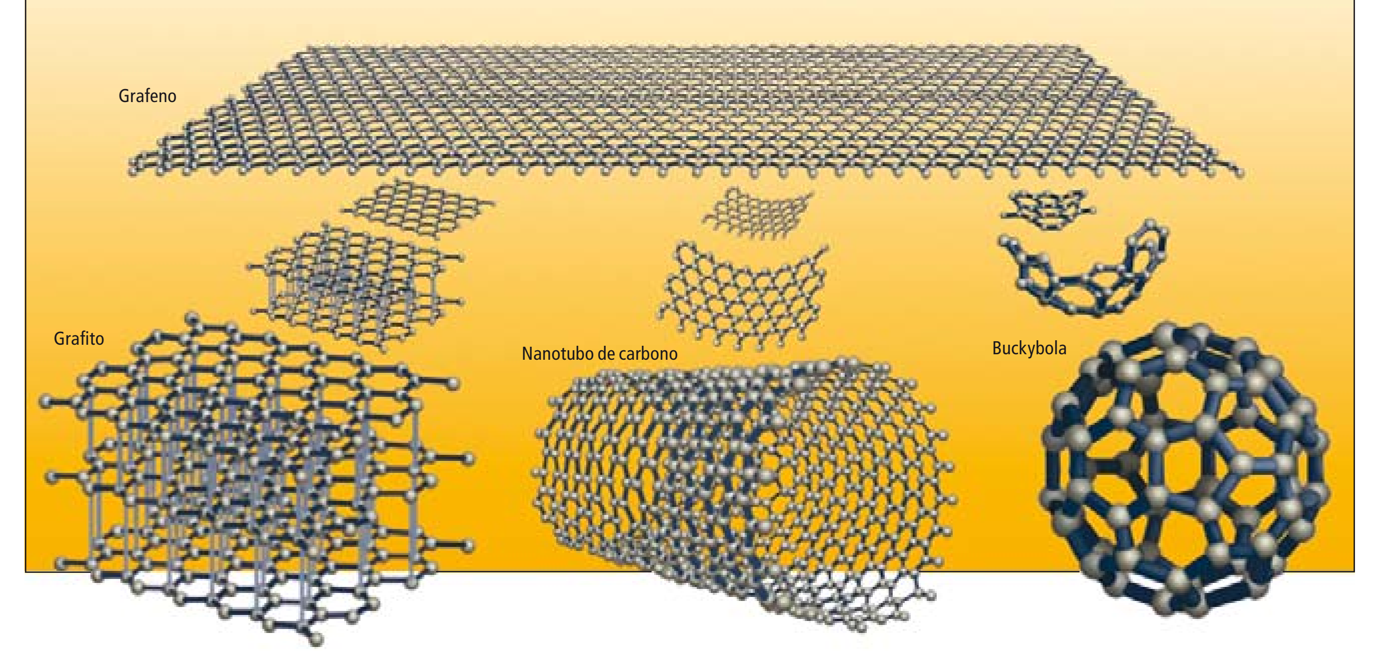
Entre tanto, la peculiar naturaleza del grafeno a escala atómica permite adentrarse en fenómenos que sólo puede describir la física cuántica relativista y que figuran entre los más singulares de la naturaleza. Su investigación hasta ahora ha sido patrimonio exclusivo de los astrofísicos y de los físicos de partículas de altas energías, que trabajan con telescopios o aceleradores de partículas que cuestan millones, o miles de millones, de euros. El grafeno

LOS TRAZOS DE UN LAPIZ CORRIENTE contienen minúsculas cantidades de grafeno, uno de los materiales “nuevos” más apasionantes en ciencia e ingeniería.



LA MADRE DE TODOS LOS GRAFITOS

El grafeno (*abajo, parte superior*), un plano de átomos de carbono semejante a una tela metálica, es la piedra angular de todos los materiales "grafíticos" ilustrados abajo. El grafito (*fila inferior, izquierda*), componente principal de la "mina" del lápiz, es una sustancia quebradiza, un "hojaldre" de láminas de grafeno débilmente unidas entre sí. Cuando el grafeno se enrolla en formas redondeadas constituye fullerenos. Entre ellos figuran cuerpos cilíndricos —los nanotubos de carbono (*fila inferior, centro*)— y unas moléculas semejantes a balones de fútbol, las buckybolas (*fila inferior, derecha*), más otras formas diversas que son combinaciones de ambas.



MATT COLLINS

permite poner a prueba las predicciones de la mecánica cuántica relativista con instrumental de mesa de laboratorio.

La familia del grafeno

Curiosamente, estando hoy tan extendido el uso del lápiz, el grafito fue desconocido para las muy letradas civilizaciones antiguas de China o Grecia. No apareció hasta el siglo XVI, cuando los ingleses descubrieron un gran yacimiento de grafito puro, al que denominaron *plumbago* (directamente del latín "mineral de plomo", y traducido al español como plombagina). Su utilidad para escribir se advirtió enseguida, y pasó a ser una cómoda alternativa a la pluma y el tintero. Pronto hizo furor el lápiz entre los intelectuales europeos.

Pero hasta 1779 no descubriría el químico sueco Carl Scheele que el *plumbago* era carbono, y no plomo. Diez años después, un geólogo alemán, Abraham Gottlob Werner, sugirió un nombre más adecuado para esta sustancia: grafito, del griego *grafein*, que significa "escribir". Mientras tanto, un material tan desmenuzable se había revelado útil como forro interior de los moldes para fundir balas de cañón. Por considerarse secreto militar esta aplicación, la Corona Inglesa llegó a embargar la venta a Francia de grafito y de lápices durante las Guerras Napoleónicas.

En los últimos decenios, el grafito ha recuperado en parte su prestigio en la técnica, al haberse explorado las propiedades y posibles aplicaciones de varias formas moleculares de carbono, antes desconocidas, que se presentan en materiales grafíticos ordinarios. La primera de ellas, una molécula con forma de balón de fútbol (la buckybola), fue descubierta en 1985 por Robert Curl, Richard E. Smalley y Harry Kroto. Seis años después, Sumio Iijima descubrió configuraciones cilíndricas de átomos de carbono, semejantes a panales enrollados, los nanotubos de carbono. Aunque muchos investigadores los habían descubierto en decenios anteriores, no apreciaron su importancia. Ambos tipos moleculares se clasificaron como fullerenos. (Nombre, como el de buckybola, dado en honor del arquitecto e ingeniero Buckminster Fuller, quien investigó esas formas antes de que se descubriesen sus versiones de carbono.)

Una tela metálica molecular

El grafeno, los fullerenos y el grafito parten todos de la misma estructura molecular básica: un hexágono regular formado por seis átomos de carbono en estrecha unión química, el "anillo bencénico".

En el siguiente nivel estructural está el propio grafeno: un gran conjunto de anillos

bencénicos unidos en una lámina semejante a una tela metálica. Las demás formas grafíticas parten todas del grafeno. Tanto la buckybola como muchos otros fullerenos no tubulares pueden considerarse láminas de grafito que forman esferas, esferoides alargados y configuraciones semejantes a escala atómica. Los nanotubos, en esencia, son láminas de grafeno enrolladas en diminutos cilindros. Y, como ya se ha señalado, el grafito no es sino una gruesa pila de láminas de grafeno que se mantienen unidas por unas débiles interacciones, las fuerzas de Van der Waals. Al ser débil esa interacción entre láminas contiguas, resulta muy fácil descomponer el grafito en obleas minúsculas, como las marcas que deja el lápiz sobre el papel.

Los fullerenos siempre han estado a mano, aunque hasta hace poco no nos hayamos dado cuenta. En cantidades mínimas se encuentran en el hollín que recubre una parrilla de barbacoa. Y hay vestigios de grafeno en todas las marcas de lápices, y también han pasado inadvertidos. Desde su descubrimiento, sin embargo, se ha prestado gran atención a todas estas moléculas.

Las buckybolas son notables, sobre todo, como ejemplo de un tipo de molécula fundamentalmente nuevo, que además podría ser de gran utilidad, especialmente en la administración de fármacos. Los nanotubos de carbono reúnen una serie de propiedades singulares —químicas, electrónicas, mecánicas, ópticas y térmicas— que han inspirado múltiples innovaciones potenciales. Entre ellas, materiales capaces de sustituir al silicio en los microchips y fibras para confeccionar cables ligeros y de enorme resistencia mecánica. Aunque el grafeno en sí —la madre de todas las formas grafíticas— sólo forme parte de ese horizonte desde hace poco, cabe esperar que elucide aún más cuestiones de física básica y ofrezca más aplicaciones técnicas fascinantes que sus parientes carbónicos.

Los autores

André K. Geim y **Philip Kim** son físicos de la materia condensada que en los últimos años han investigado las propiedades nanométricas de los materiales cristalinos "bidimensionales" de un átomo de espesor. Geim es miembro de la Regia Sociedad de Londres y ocupa la cátedra Langworthy de física de la Universidad de Manchester. Dirige además el Centro de Manchester para la Mesociencia y la Nanotecnia. Se doctoró en el Instituto de la Física del Estado Sólido de Chernogolovka, Rusia. Kim, miembro de la Sociedad Norteamericana de Física, se doctoró en la Universidad de Harvard y es profesor agregado de física en la Universidad de Columbia. Su investigación se centra en procesos de transporte cuántico térmicos y eléctricos en materiales de escala nanométrica.

Singularidad excepcional

El grafeno posee dos propiedades que le confieren un carácter excepcional. La primera de ellas es su elevada calidad, pese a que aún se le esté fabricando de modo bastante tosco. Esa calidad es resultado de su pureza en carbono, combinada con la regularidad del retículo en el que se disponen sus átomos. Hasta ahora, no ha podido encontrarse un solo defecto atómico en el grafeno, sea una posición atómica vacante en el retículo o un átomo fuera de su sitio. Un orden cristalino tan perfecto parece derivarse de unos enlaces interatómicos de enorme solidez, aunque muy flexibles; se crea así una sustancia más dura que el diamante, pero cuyos planos pueden curvarse cuando se les aplica un esfuerzo mecánico. La flexibilidad de la estructura admite grandes deformaciones antes de que sus átomos tengan que reorganizarse para acomodar la tensión.

La calidad del retículo cristalino determina también la conductividad eléctrica, notablemente alta, del grafeno. Los electrones se desplazan por el material sin ser desviados de su curso por imperfecciones del retículo ni por átomos extraños. Merced a la tenacidad de los enlaces interatómicos, ni siquiera son importantes las perturbaciones que sufren los electrones del grafeno a temperatura

MATT COLLINS (*dibujos*); KOSTYA NOVOSELOV *Universidad de Manchester* (*micrografía*)

LA MARCA DE UN NANOLAPIZ

Ha costado mucho trabajo obtener muestras grafíticas de espesor próximo al de una capa de grafeno. Un procedimiento consiste en fijar un microcristal de grafito al brazo volado de un microscopio de fuerza atómica y raspar la punta del microcristal contra una oblea de silicio (*izquierda*). Este "nanolápiz" deposita unas delgadas "tortas" de grafeno sobre la oblea (*derecha*). Se representan aquí muestras observadas por micrografía electrónica a 6000 aumentos.



ambiente, a causa de los átomos de carbono circundantes.

La segunda propiedad excepcional del grafeno estriba en sus electrones, que, además de desplazarse por el retículo sin impedimentos significativos, se mueven mucho más deprisa —como si su masa fuese mucho menor— que los electrones que circulan por los metales y semiconductores ordinarios. Los electrones del grafeno —tal vez deberían llamarse "portadores de carga eléctrica"— son unos entes curiosos, que habitan un extraño mundo donde imperan leyes análogas a las de la mecánica cuántica relativista. Por lo que sabemos, este tipo de interacción en el interior de un sólido es exclusivo del grafeno. Gracias a tan novedoso material, que forma parte de un lápiz, la mecánica relativista no queda reservada a la cosmología o la física de altas energías; ahora pertenece también al laboratorio.

Cuasipartículas en la planicie del carbono

Para apreciar el mágico comportamiento de los portadores de carga eléctrica en el grafeno, comparémoslo con el movimiento de los electrones ordinarios en un conductor normal. Los electrones "libres" que componen la corriente eléctrica en un metal, por ejemplo, no son libres del todo; no se comportan exactamente igual que los electrones en el vacío. Transportan una carga negativa y, al desplazarse por el metal, dejan un déficit de carga en los átomos de donde proceden. De este modo, los electrones que circulan por el retículo cristalino interactúan con los campos electrostáticos creados por éste, que los desplaza en uno y otro sentido de manera compleja. El resultado final es que los electrones móviles se comportan como si su masa, su "masa efectiva", fuera distinta de la masa de los electrones ordinarios. A estos portadores de carga se los llama cuasipartículas.

Estas partículas cargadas, semejantes a electrones, se desplazan a través de un metal conductor a velocidad muy inferior a la de la luz. No habría, pues, necesidad de aplicar a su movimiento las correcciones relativistas de Einstein, que sólo serían relevantes cuando las velocidades se aproximan a la de la luz. Para describir las interacciones de las cuasipartículas en un conductor podemos acudir a la física tradicional de Newton o a la mecánica cuántica "ordinaria" (es decir, no relativista).

También se comportan como una especie de cuasipartículas los electrones que viajan a través de la red hexagonal de átomos de carbono del grafeno. Lo que sorprende es que estas cuasipartículas portadoras de carga actúan en el grafeno de un modo muy

La electrodinámica cuántica pasa al laboratorio

Los electrones se desplazan sin apenas obstrucción por la estructura atómica, muy regular, del grafeno. Alcanzan velocidades tales, que su comportamiento no puede describirse mediante la mecánica cuántica "ordinaria". La teoría que ha de aplicarse es la mecánica cuántica relativista, o electrodinámica cuántica, cuyas peculiares predicciones hasta ahora no se creía que fueran observables más que en los agujeros negros o los aceleradores de partículas de altas energías. Con el grafeno, sin embargo, es posible ensayar en el laboratorio una de sus predicciones más insólitas: "el efecto túnel cuántico perfecto".

En la física clásica newtoniana, un electrón de baja energía (*bola verde en 1a*) se comporta como una partícula ordinaria. Si su energía no es suficiente para superar una barrera de energía potencial, se quedará atrapado a un lado de la barrera (*1b*) como un camión que agotara el combustible antes de remontar la colina.

En la mecánica cuántica ordinaria, el electrón actúa en ciertos contextos como una onda que se propaga por el espacio. Esa onda viene a ser la probabilidad de que el electrón se encuentre en una posición determinada en el espacio y en el tiempo. Cuando esa onda "lenta" se aproxima a una barrera de potencial (*onda azul en 2a*), penetra la barrera de un modo tal, que existe alguna probabilidad, ni 0 ni 100 por ciento, de que se detecte el electrón al otro lado de la barrera (*2b*). Se dice que el electrón traspasa por efecto túnel la barrera.

Cuando la onda de un electrón rápido del grafeno (*onda naranja en 3a*) llega a una barrera de potencial, la electrodinámica cuántica aventura una predicción aún más sorprendente: el electrón-onda se encontrará inmediatamente al otro lado de la barrera con probabilidad del 100 por ciento (*3b*). La excelente conductividad eléctrica del grafeno parece confirmar esa predicción.



distinto del electrón. De hecho, la partícula elemental que más se les asemeja es el neutrino, casi desprovisto de masa. Señalemos que el neutrino, de acuerdo con su nombre, es eléctricamente neutro, mientras que la cuasipartícula del grafeno transporta la misma carga eléctrica que el electrón. No obstante, como el neutrino se desplaza a velocidad próxima a la de la luz, cualquiera que sea su energía o cantidad de movimiento, ha de describirse por medio de la teoría de la relatividad. De modo análogo, la cuasipartícula del grafeno se mueve siempre a velocidad constante, aunque 300 veces menor que la velocidad de la luz. Pese a esta reducción de escala, se comporta en estrecho paralelismo con el relativista neutrino.

La naturaleza relativista de las cuasipartículas de grafeno torna inútil la mecánica cuántica ordinaria, no relativista, para describir su actuación. Hay que recurrir a un marco más complejo, el de la mecánica cuántica relativista, o electrodinámica cuántica. Esta teoría posee su propio lenguaje, cuyo núcleo central es la ecuación probabilista de Dirac (formulada por Paul A. M. Dirac en los años veinte del pasado siglo). De ahí que a veces se trate a los electrones móviles del grafeno como cuasipartículas de Dirac sin masa.

Partículas que vienen de la "nada"

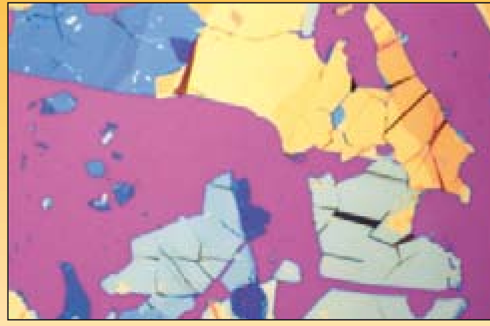
Por desgracia, la interpretación de la electrodinámica cuántica nunca se libra de un fuerte combate contra la intuición ordinaria. Es preciso familiarizarse, aunque nunca se llegue a estar a gusto, con fenómenos aparentemente paradójicos. En este terreno de la física, las paradojas suelen proceder de las partículas relativistas, que siempre tienen como compañeras sus antipartículas. El electrón se empareja con una antipartícula llamada positrón, de masa exactamente igual aunque de carga eléctrica positiva. En condiciones relativistas puede producirse una pareja electrón-positrón porque a un objeto de alta energía que se mueve con extrema rapidez le cuesta poca energía crear una pareja de "partículas virtuales". Pero lo extraño es que la pareja surja directamente de la nada, del vacío.

El porqué de tal fenómeno es consecuencia de una de las numerosas versiones del principio de incertidumbre de Heisenberg, esencial en la mecánica cuántica: en pocas palabras, cuanto mayor sea la precisión con que se determina un suceso en el tiempo, menos exacta será la cantidad de energía asociada a tal evento. En consecuencia, en intervalos de tiempo extremadamente cortos la energía puede alcanzar casi cualquier valor. Según la famosa fórmula de Einstein $E = mc^2$, la energía equivalente a la masa de una partícula y su antipartícula puede salir de la nada. Por ejemplo, un electrón virtual y un positrón virtual pueden nacer repentinamente "tomando prestada" energía del vacío, siempre que los tiempos de vida de esas partículas virtuales sean tan cortos que el déficit de energía se restituya antes de que pueda ser detectado.

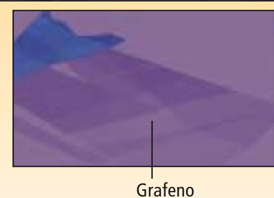
El misterioso dinamismo del vacío en la electrodinámica cuántica conduce a numerosos fenómenos peculiares. Un buen ejemplo nos lo ofrece la paradoja de Klein, que describe las circunstancias en las que un objeto relativista puede atravesar cualquier barrera de energía potencial, sea cual fuere su altura o su anchura. Una conocida barrera de energía potencial es un terreno en pendiente que rodee un valle. Cuando un camión sale del valle, al subir la cuesta adquiere energía potencial a expensas de la energía que desprende el combustible quemado en el motor. Al sobrepasar la cima,

Grafeno de artesanía

1. Trabajar en un ambiente limpio; los restos de suciedad o de pelos hacen estragos en las muestras de grafeno.
2. Preparar una oblea de silicio oxidado, lo que ayuda a observar las capas de grafeno al microscopio. Para suavizar y limpiar la superficie de la oblea que ha de aceptar el grafeno, aplicar una mezcla de ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno.
3. Adherir mediante unas tenacillas una escama de grafito a una cinta adhesiva de plástico de unos quince centímetros. Doblar la cinta en un ángulo de 45 grados junto a la escama, de manera que quede intercalada entre las dos caras adhesivas. Apretar delicadamente y despegar luego la cinta con lentitud suficiente para que el grafito se divida poco a poco en dos mitades.



4. Repetir la tercera etapa unas 10 veces. La dificultad crece con el número de veces.



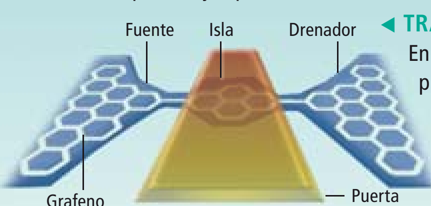
5. Depositar con todo cuidado en el silicio la muestra de grafito hendida que permanece pegada a la cinta. Con alicates de plástico, apretar suavemente para expulsar todo el aire que haya quedado entre la cinta y la muestra. Durante 10 minutos pasar ligera pero firmemente los alicates por la muestra. Mantener, haciendo uso de los alicates, la oblea sobre la superficie mientras se desprende lentamente la cinta. Esta etapa deberá durar de 30 a 60 segundos para que sea mínimo el desgarramiento del grafeno obtenido.
6. Colocar la oblea bajo un microscopio con una lente objetivo de 50 o 100 aumentos. Se observarán multitud de restos de grafito: fragmentos grandes y brillantes de todas formas y colores (*imagen superior*) y, si hay suerte, grafeno: formas cristalinas, de gran transparencia, de color débil si se compara con el resto de la oblea (*imagen inferior*). La muestra superior se ha aumentado 100 veces, y 200 veces, la inferior.

— *J. R. Minkel, colaborador*

PETER BLAKE *Graphene Industries Ltd.*

LA TECNICA DEL GRAFENO

Es demasiado pronto para el desarrollo de productos basados en un material tan reciente. Se prevé, no obstante, una extensa lista de aplicaciones. Presentamos aquí dos ejemplos:



◀ TRANSISTOR DE UN SOLO ELECTRON

En un plano de grafeno a escala nanométrica puede formarse un transistor de un solo electrón (o transistor de punto cuántico). El diagrama (*izquierda, arriba*) esquematiza dos electrodos, una "fuente" y un "drenador", conectados por una "isla" de material conductor —un punto cuántico— que sólo mide 100 nanómetros de ancho. La isla, en el centro de una micrografía electrónica del dispositivo (*izquierda, abajo*) a 40.000 aumentos, es demasiado pequeña para admitir más de un electrón a la vez; si un segundo electrón lo intenta, será rechazado por repulsión electrostática. Un electrón procedente de la fuente entra en la isla por efecto túnel mecanicocuántico; después sale, también por efecto túnel, hacia el drenador. La tensión aplicada a un tercer electrodo llamado "puerta" (no representado aquí) controla si un electrón puede entrar o salir de la isla, registrándose así un 1 o un 0.

MATERIALES COMPUESTOS ▶

A menudo pueden combinarse dos o más materiales complementarios para obtener las propiedades deseables de ambos. Suelen utilizarse una matriz grande y un refuerzo: algo así como un casco de barco construido en plástico con resistentes fibras de vidrio insertadas. Se están ensayando las propiedades físicas de materiales compuestos fabricados con polímeros reforzados con materiales como el óxido de grafeno: un grafeno modificado químicamente que es rígido y resistente. A diferencia del grafeno puro, el "papel" de óxido de grafeno (*derecha, superposición*) no es muy difícil de fabricar y podría encontrar pronto una aplicación útil en los materiales compuestos laminados (*derecha, fondo*). La barra de escala mide un micrometro.

DANIELA NAOMI MOLNAR (*ilustración*); LEONID PONOMARENKO *Universidad de Manchester* (*micrografía*)

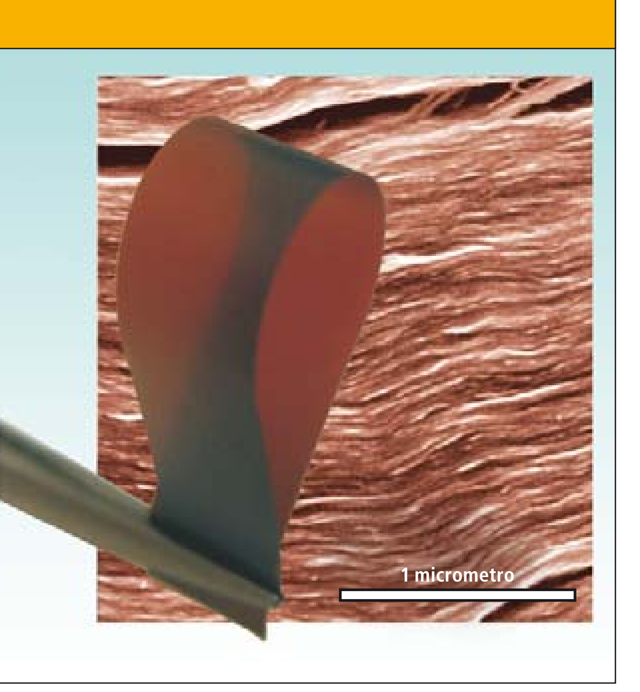
sin embargo, el camión puede ya descender por la otra vertiente con el motor apagado y la transmisión en punto muerto. La energía potencial que se ganó en la subida se restituye en forma de energía cinética en la marcha cuesta abajo.

Probando lo extravagante

Las partículas se mueven fácilmente "cuesta abajo" por sí mismas, desde regiones de energía potencial más elevada a otras donde sea más baja. Pero si en torno de una partícula situada en un "valle" de energía se levanta una "ladera montañosa" de alta energía potencial, esa partícula se encontrará tan atascada como pueda estarlo un camión sin gasolina en el fondo de un valle real. Debe, sin embargo, advertirse que esta conclusión no es válida en la mecánica cuántica ordinaria, no relativista. Una segunda versión del principio de incertidumbre de Heisenberg sostiene que es imposible saber la posición exacta de una partícula, que sólo cabe describirla en términos de probabilidad. De ello se infiere una extraña consecuencia: aun cuando una partícula de baja energía parezca quedar "atrapada" por una barrera elevada, hay cierta probabilidad de que se encuentre después más allá de esa barrera. Esa fantasmal penetración de la barrera de potencial recibe el nombre de efecto túnel cuántico.

Si el efecto túnel cuántico no es relativista, la probabilidad de que una partícula de baja energía atraviese una barrera de elevada energía potencial será variable, pero nunca llegará al 100 por ciento. La probabilidad disminuye a medida que la barrera crece en altura y espesor. La paradoja de Klein, sin embargo, cambia el carácter del efecto túnel cuántico: afirma que las partículas relativistas atravesarán regiones de alta energía y gran anchura con una probabilidad del 100 por ciento. En la barrera, las partículas se emparejan con sus antipartículas gemelas, que experimentan un mundo al revés donde las colinas del mundo real son valles para las antipartículas. Tras atravesar con facilidad ese aparente valle, las antipartículas vuelven a convertirse en partículas al otro lado, y emergen sin impedimento alguno. Esta predicción de la electrodinámica cuántica repugna a la intuición, incluso a la de muchos físicos.

Una predicción tan extraordinaria exige ser probada. Durante mucho tiempo, se ha dudado de poder hacerlo, aunque sólo fuese en principio. El auxilio ha venido de las cuasipartículas de Dirac sin masa del grafeno. En este material, la paradoja de Klein constituye un fenómeno rutinario, de consecuencias fácilmente observables. La aplicación de una tensión eléctrica, o diferencia de potencial, a un cristal de grafeno mueve en su interior las cuasipartículas de Dirac portadoras de carga, lo cual permite medir la conductividad eléctrica del material. La perfección del efecto túnel (100 por ciento probable) explica que las barreras y obstáculos interpuestos no añadan resistencia. En la actualidad se está midiendo el paso de estas partículas a través de barreras de potencial de altura variable. Se espera que el grafeno ayude también a demostrar otros efectos extraños que predice la electrodinámica cuántica.



DE "PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF GRAPHENE OXIDE-BASED PAPER", POR DMITRY A. DIKIN ET AL., EN *NATURE*, VOL. 448; 2007

Grafeno práctico

Es demasiado pronto para evaluar en profundidad las múltiples posibilidades técnicas que ofrece el grafeno. Más de diez años de investigaciones sobre los nanotubos de carbono —en realidad, grafeno enrollado— suponen una inmensa ventaja; no es descabellado pensar que casi todas las aplicaciones de los nanotubos estén también al alcance de su pariente plano. Hay empresas que piensan ya en aplicaciones comerciales.

Para atender la nueva demanda habrá que producir grafeno en gran cantidad; hay muchos investigadores dedicados al desarrollo de técnicas perfeccionadas. Aunque el grafeno en polvo ya se puede producir a escala industrial, la lámina de grafeno resulta todavía muy difícil de conseguir; quizá sea ahora el material más caro del planeta. Un diminuto cristal de grafeno, más fino que un cabello humano, dividido por medios micromecánicos, puede hoy costar más de 1000 dólares.

Varios grupos de instituciones europeas y estadounidenses —entre ellas, el Instituto de Tecnología de Georgia, la Universidad de California en Berkeley y la Universidad del Noroeste— han logrado hacer crecer películas de grafeno sobre obleas de carburo de silicio parecidas a las que se usan en la industria de los semiconductores.

Entre tanto, los ingenieros de todo el mundo se esfuerzan por explotar unas propiedades físicas y electrónicas que son exclusivas del grafeno y sumamente deseables. Su alta relación superficie/volumen lo hace de fácil manejo para la fabricación de materiales compuestos (*composites*) de gran resistencia. La extrema delgadez del grafeno permitiría también obtener emisores de campo de mayor rendimiento: unos dispositivos semejantes a agujas que emiten electrones en presencia de intensos campos eléctricos.

La aplicación de campos eléctricos permite un fino ajuste de las propiedades del grafeno; podrían así construirse transistores superconductores y de válvula de espín, amén de detectores químicos ultrasensibles. Por último, las películas delgadas formadas por retazos de grafeno superpuestos serían idóneas para revestimiento transparente y conductor de pantallas de cristal líquido y células solares. La lista no es en absoluto exhaustiva, pero esperamos que ciertas aplicaciones especializadas puedan llegar al mercado en sólo unos años.

¿Prolongar la ley de Moore?

Un campo de la ingeniería merece especial mención: la electrónica basada en el grafeno. Se ha hecho hincapié en que los portadores de carga se desplazan por el grafeno a gran velocidad con escasas pérdidas de energía por dispersión o colisiones con los átomos de su retículo cristalino. Esta propiedad debería permitir la creación de transistores balísticos, dispositivos de frecuencia ultraelevada que responderían con mucha mayor rapidez que los transistores actuales.

Aún es más tentadora la posibilidad de que el grafeno venga en ayuda de la industria microelectrónica para prolongar la vigencia de la ley de Moore. Gordon Moore, pionero de la industria electrónica, señaló hace unos 40 años que el número de transistores integrados en una determinada área se duplicaría cada 18 meses, aproximadamente. Muchas veces se ha anunciado antes de tiempo el inevitable fin de esa incesante miniaturización. La notable estabilidad y conductividad eléctrica del grafeno, incluso a escala nanométrica, permitiría fabricar transistores de menos de 10 nanómetros y quizá de la pequeñez de un anillo bencénico. A largo plazo, es posible imaginar circuitos integrados realizados en una lámina individual de grafeno.

Cualquiera que sea el futuro, es casi seguro que el maravilloso país de un solo átomo de grosor se mantendrá en el candelero durante las próximas décadas. Los ingenieros seguirán trabajando para llevar al mercado innovadores productos y los físicos continuarán ensayando exóticas propiedades cuánticas. Pero lo que de verdad asombra es que toda esta riqueza y complejidad haya estado durante siglos oculta en una sencilla marca de lápiz.

Bibliografía complementaria

ELECTRONS IN ATOMICALLY THIN CARBON SHEETS BEHAVE LIKE MASSLESS PARTICLES. Mark Wilson en *Physics Today*, vol. 59, págs. 21-23; enero de 2006.

DRAWING CONCLUSIONS FROM GRAPHENE. Antonio Castro Neto, Francisco Guinea y Nuno Miguel Peres en *Physics World*, vol. 19, págs. 33-37; noviembre de 2006.

GRAPHENE: EXPLORING CARBON FLATLAND. A. K. Geim y A. H. MacDonald en *Physics Today*, vol. 60, págs. 35-41; agosto de 2007.

THE RISE OF GRAPHENE. A. K. Geim y K. S. Novoselov en *Nature Materials*, vol. 6, págs. 183-191; 2007.



Recuperación del mar de Aral

Vaciar de manera imprudente el cuarto lago mayor del mundo para regar campos de labor lo convirtió en un desierto seco y tóxico. Se está recuperando ahora su parte septentrional

Philip Micklin y Nikolay V. Aladin

CONCEPTOS BASICOS

- El mar de Aral era el cuarto mayor lago del mundo en 1960. En 2007 ocupaba sólo el 10 por ciento de su tamaño original. Los regadíos a lo largo de los ríos Amu y Syr, que alimentan el Aral, redujeron la entrada de agua hasta un escuálido goteo.
- El mar se ha reducido a tres lagos residuales principales; dos de ellos son tan salados, que apenas quedan peces nativos. Las flotas pesqueras, antaño prósperas, han desaparecido. Los entonces pueblos ribereños se han arruinado. Vastas extensiones del fondo del lago han quedado al descubierto y se han secado. Los vientos transportan sales y sustancias tóxicas por zonas pobladas, con grave riesgo para la salud.
- Una presa construida en 2005 ha facilitado la expansión del lago y la reducción de la salinidad en la zona más septentrional. Las poblaciones de peces y los humedales se están recuperando y, con ellos, la economía. Los dos grandes lagos meridionales podrían convertirse en mares muertos, a menos que se lleven a cabo en el río Amu importantes obras de ingeniería; el proyecto requerirá una inversión de decenas de miles de millones de euros y acuerdos políticos difíciles.
- Otros lagos empiezan a correr la misma suerte: el lago Chad, en Africa Central, y el mar de Salton, en el sur de California. Las lecciones que se han aprendido de la desaparición del Aral y su recuperación parcial podrían aprovecharse en las regiones mencionadas.

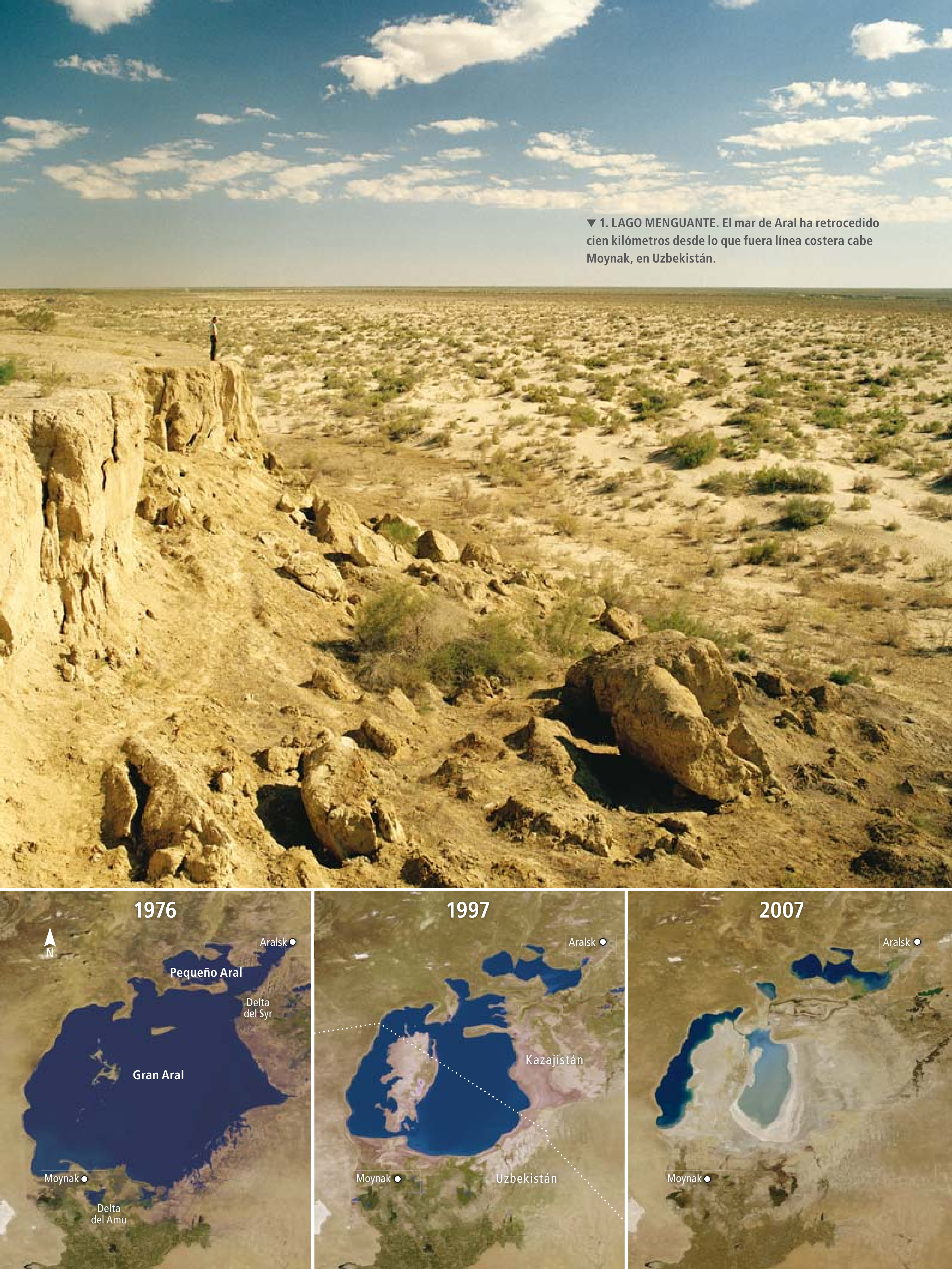
RUINA

El mar de Aral se alimenta de los ríos Amu Daria y Syr Daria. Durante milenios, el curso del Amu se ha apartado del mar en numerosas ocasiones, recortando su extensión. Cuando el Amu reconquistaba su antiguo curso, el lago se recuperaba. En la actualidad, el riego intenso de cultivos como el algodón y el arroz extrae gran parte del agua de los dos ríos, con la mengua considerable del caudal que llega a sus deltas y, por tanto, al lago. La evaporación sobrepasa con mucho la aportación de la lluvia, la fusión de la nieve o el manto freático, lo que disminuye el volumen de agua e incrementa la salinidad.

La Unión Soviética ocultó durante decenios la desaparición del mar de Aral. Fue en 1985 cuando Mihaíl Gorbachov reveló la enorme tragedia ambiental y humana. A finales del decenio de los ochenta, el nivel del mar había descendido tanto, que el agua se había separado en dos masas: el Pequeño Aral (al norte) y el Gran Aral (al sur).

Hacia 2007, la parte sur se había escindido en una cuenca occidental profunda, una cuenca oriental somera y un golfo pequeño y aislado. El volumen del Gran Aral se había reducido de 708 a 75 kilómetros cúbicos (km^3). La salinidad había aumentado desde 14 hasta más de 100 gramos por litro (g/l). La disolución en 1991 de la Unión Soviética dividió el lago entre los nuevos estados de Kazajistán y Uzbekistán. Y se dio carpetazo a un ambicioso proyecto soviético para aportar agua mediante canalizaciones desde los lejanos ríos siberianos. Se desató, por contra, la competencia sobre el recurso menguante.

MATTHIEU PALEY *Corbis (mar sin agua)*; WORLD SAT *(imágenes por satélite)*; MAPPING SPECIALISTS *(todos los mapas)*; LUCY READING-IKKANDA *(todas las ilustraciones)*



▼ **1. LAGO MENGUANTE.** El mar de Aral ha retrocedido cien kilómetros desde lo que fuera línea costera cabe Moynak, en Uzbekistán.

COLAPSO ECOLOGICO

La desecación del mar de Aral ha conllevado graves consecuencias. La disminución del caudal de los ríos acabó con las inundaciones primaverales que alimentaban a los humedales, proporcionándoles agua dulce y sedimento enriquecido. El número de especies de peces del lago cayó de 32 a seis, debido a la salinidad creciente y a la pérdida de áreas de freza y alimentación (la mayoría sobrevivieron en los deltas de los ríos). Las pesquerías comerciales, que capturaron 40.000 toneladas métricas de peces en 1960, habían desaparecido a mediados de los ochenta; se perdieron más de 60.000 puestos de trabajo. Entre las especies que permanecieron en el lago, la más común era la platija del mar Negro (*kambala* en ruso), un pez de agua salada introducido en los años setenta; en 2003, había desaparecido de los lagos meridionales porque la salinidad superaba los 70 g/l (el doble de la salinidad oceánica normal).

También la navegación cesó en el Aral, dado que el agua retrocedió a kilómetros de los principales puertos: Aralsk al norte y Moynak al sur. El mantener abiertos canales cada vez más largos hasta las ciudades se hizo demasiado costoso. El descenso del nivel del lago provocó la reducción del nivel freático; se intensificó la desertización. Mediados los noventa, apenas si quedaban trechos salpicados de halófitos (plantas que toleran suelos salinos) y xerófitos (vegetales adaptados a los medios secos) allí donde antaño habían prosperado lozanas extensiones de árboles, arbustos y matas de ribera. En la zona medraban sólo la mitad de las especies de mamíferos y aves nativas. El clima cambió hasta unos 100 kilómetros de la línea de costa original. Los veranos son ahora más cálidos, más fríos los inviernos, menor la humedad (y por tanto la pluviosidad), más corta la estación de crecimiento y habitual la sequía.

▼ **3. TRENES DE MERCANCIAS que antaño transportaban productos manufacturados y alimentos desde la próspera ciudad portuaria de Aralsk se hallan hoy en estado ruinoso, lo mismo que la economía de la ciudad.**



▼ **2. LA EXTENSA CUENCA HIDROGRAFICA del mar de Aral (*arriba*) apenas proporciona agua porque los canales de riego (*fotografía*) extraen agua de los ríos Amu y Syr a lo largo de cientos de kilómetros y a través de varios países. La consecuencia ha sido la desaparición de numerosas especies de animales y plantas (*abajo*).**





PERDIDAS ECOLOGICAS (a lo largo de 30 años)

Marisma (hectáreas): De 100.000 en 1960 a 15.000 en los años noventa

Especies de peces: De 32 a 6

Especies de aves: De 319 a 160

Especies de mamíferos: De 70 a 32

KAZUYOSHI NOMACHI *Corbis* (*fotografía aérea*); PAUL HOWELL *Sygma/Corbis* (*tren*)

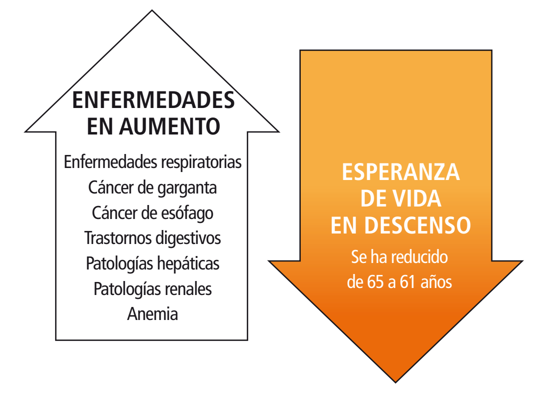
SUSTANCIAS TOXICAS

El mar en retirada ha dejado al descubierto y ha desecado 54.000 kilómetros cuadrados de fondos lacustres. Atestados de sal y, en algunos lugares, cubiertos con plaguicidas y otras sustancias de uso agrícola depositadas por la escorrentía desde los campos de labor. Fuertes vendavales transportan sal, polvo y contaminantes a distancias de hasta 500 kilómetros. Los vientos del norte y el nordeste impulsan las tormentas más intensas, que impactan en el delta del Amu, en el sur, el área de mayor densidad de población y mayor importancia económica y ecológica de la región. El bicarbonato sódico, cloruro sódico y sulfato sódico en suspensión aérea matan o retardan el crecimiento de la vegetación y los cultivos: una paradoja cruel, pues el riego de esos cultivos ha sido lo que ha vaciado el mar.

La población local padece una incidencia elevada de enfermedades respiratorias, cáncer de garganta y esófago y trastornos digestivos causados por la respiración y la ingestión de aire y agua cargados de sal. Las enfermedades hepáticas y renales, así como los trastornos oculares, son comunes. La pérdida de peces ha reducido la variedad de la dieta; han aumentado la desnutrición y la anemia, sobre todo en las mujeres embarazadas.

La isla de Vozrozhdeniya plantea también un problema único. Cuando se hallaba lejos de la costa, la Unión Soviética utilizaba Vozrozhdeniya como campo de pruebas para armas biológicas. Se ensayaron carbunco, tularemia, brucelosis, peste, tifus, sarampión y la toxina del botulismo en caballos, monos, ovejas, asnos y animales de laboratorio. Con la retirada de las aguas, Vozrozhdeniya quedó unida al continente por el sur en 2001. Se teme que los organismos utilizados como armas biológicas hayan sobrevivido y alcancen, a través de las pulgas de roedores infectados, la población humana o que caigan en manos de terroristas.

EFECTOS SOBRE LA SALUD
de la población de la zona







▲ **4. BASURA Y PLAGUICIDAS vertidos en el puerto de Aralsk se hallan ahora al descubierto (*arriba*). Intensas tormentas (*centro*) aventan sustancias tóxicas y enormes cantidades de arena y sales secas a través de la región, con la ruina consiguiente de cosechas y la aparición de enfermedades en la población local.**



▶ **5. LANCHA PATRULLERA que los soviéticos usaban para la vigilancia de armas biológicas en la isla de Vozrozhdeniya. Hoy se halla varada en el fondo seco del lago.**

ANTOINE GYORI AGP/Corbis (basura marina); JACQUES DESCLOITRES MODIS Land Rapid Response Team, NASA GSFC (tormenta de polvo); PHILIP MICKLIN (lancha)

ESPERANZA PARA EL NORTE

Retornar todo el mar de Aral a su estado de 1960 no parece factible. El caudal de entrada anual procedente de los ríos Syr y Amu debería cuadruplicar el promedio actual de 13 km^3. La única manera de hacerlo sería cercenar la irrigación, que supone el 92 por ciento del consumo humano de agua. Pero cuatro de las cinco antiguas repúblicas soviéticas de la cuenca del mar de Aral (Kazajistán es la excepción) tienen la intención de expandir los regadíos, para alimentar a una población creciente. Podrían introducirse cultivos menos "sedientos" (sustituir el algodón por el trigo otoñal o de invierno, por ejemplo), si los principales consumidores de agua para riego, Uzbekistán y Turkmenistán, no prefiriesen mantener el algodón, que les reporta divisas. Los extensos canales de riego podrían mejorarse; muchos de ellos son zanjas rudimentarias, por donde se filtran y derrochan enormes cantidades de agua. La modernización de la red de riego supondría un ahorro de 12 km^3 de agua anuales, pero costaría al menos 10.000 millones de euros. Los estados de la cuenca no tienen el dinero ni la voluntad política para acometerlo.

Cierto es que Kazajistán ha intentado recuperar parte del Aral septentrional. En los primeros años noventa, construyó un dique de tierra para bloquear el flujo de agua hacia el sur que se perdía por evaporación, pero una catástrofe lo destruyó en abril de 1999. Con todo, sirvió para demostrar que se podía aumentar el nivel del agua y reducir la salinidad, lo que animó a Kazajistán y al Banco Mundial a financiar un proyecto de recuperación valorado en 60 millones de euros. El elemento clave era un dique de tierra más robusto, de 13 km de largo, con una presa de hormigón y compuertas para la descarga de agua, que se terminó en noviembre de 2005. El abundante aflujo de aguas procedentes del Syr Daria en el invierno siguiente puso en marcha la recuperación del Pequeño Aral. El nivel del agua subió de 40 a 42 metros (la altura prevista) en sólo ocho meses. La superficie aumentó en un 18 por ciento; la salinidad se ha reducido a la mitad (de 20 a 10 g/l). Los pescadores vuelven a capturar varias especies en cantidades notables, entre ellas dos de gran importancia: la lucioperca (*sudak* en ruso), muy apreciada, y el *sazan* (un tipo de carpa).

RECUPERACION DE 2007
(desde que se completó la presa en 2005)

Aumento en el nivel del agua (m)
+2

Salinidad (g/l)
−5

Area (km^2)
+500

▼ **6. UNA PRESA CON COMPUERTAS (*arriba*) y un dique de 13 kilómetros que Kazajistán terminó de construir en 2005 salvaron al Pequeño Aral de la pérdida de agua a través de canales agonizantes que no conducían a ninguna parte. Desde entonces, el nivel de agua y las poblaciones de peces han aumentado (*abajo*). Las compuertas, que para controlar el nivel del lago liberan el agua sobrante, terminaron en noviembre de 2005; el agua, de dos metros de profundidad, había retornado el verano siguiente.**





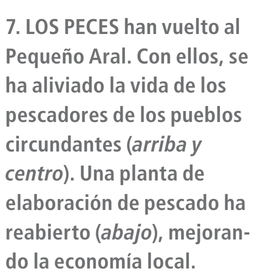
PHILIP MICKLIN (*arriba*); IGOR PLOTNIKOV (*abajo*)

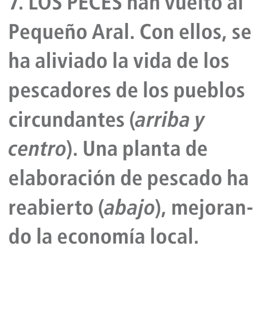
PROSPERIDAD CRECIENTE

Cabe esperar que la salinidad en el Pequeño Aral se estabilice entre tres y 14 g/l, según la zona. Esas condiciones deberían favorecer el retorno de otras especies endémicas, aunque el *kambala*, de agua salada, desaparecería de la mayor parte del lago. La recuperación podría ir más allá todavía. Por ejemplo, si las mejoras en el riego aumentaran la entrada anual de agua procedente del Syr hasta 4,5 km^3 —algo totalmente realizable—, el nivel del lago se estabilizaría en torno a los 47 metros. Ese cambio acercaría la línea de costa a unos ocho kilómetros de Aralsk (la principal ciudad portuaria del pasado), proximidad suficiente para volver a dragar un antiguo canal que conectaba la ciudad con las aguas en retirada. El canal daría acceso al mar a los grandes barcos de pesca; se restablecería la navegación comercial.

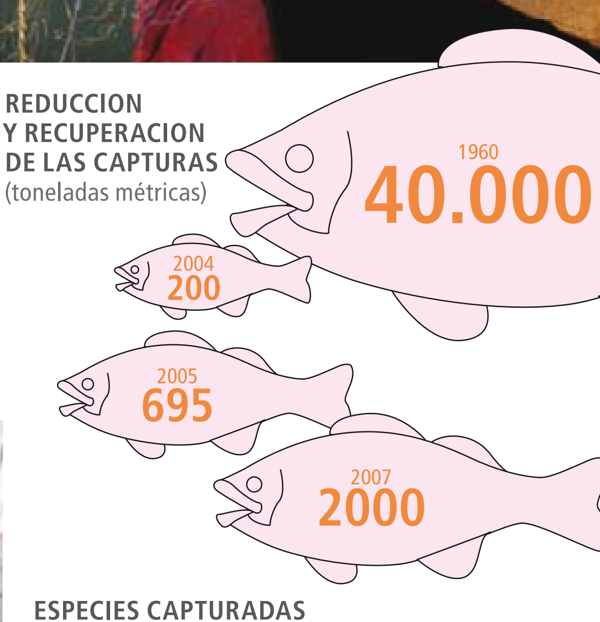
Las marismas y las poblaciones de peces se recuperarían todavía más debido a una ulterior reducción de la salinidad. También aumentaría el flujo de agua a los lagos meridionales, lo que contribuiría a su restauración. Dicho plan requeriría un dique de mayor altura y longitud, así como la construcción de un sistema de compuertas; y no está claro que el Kazajistán posea los medios necesarios o lo considere una prioridad. El país analiza ahora otras propuestas, modestas, para acercar el agua a Aralsk.







7. LOS PECES han vuelto al Pequeño Aral. Con ellos, se ha aliviado la vida de los pescadores de los pueblos circundantes (*arriba y centro*). Una planta de elaboración de pescado ha reabierto (*abajo*), mejorando la economía local.





ESPECIES CAPTURADAS
(otoño de 2007, de más a menos abundantes)

1. Carpa
2. Brema del Aral
3. Rutilo del Aral
4. Lucioperca
5. Platija
6. Aspio del Aral
7. Brema del Danubio
8. Carpín
9. Pez sable
10. Lucio
11. Perca
12. Escardinio
13. Alburno del Danubio
14. Siluro
15. Cabeza de serpiente
16. Idus turquestano



SYLVAIN LIECHTI

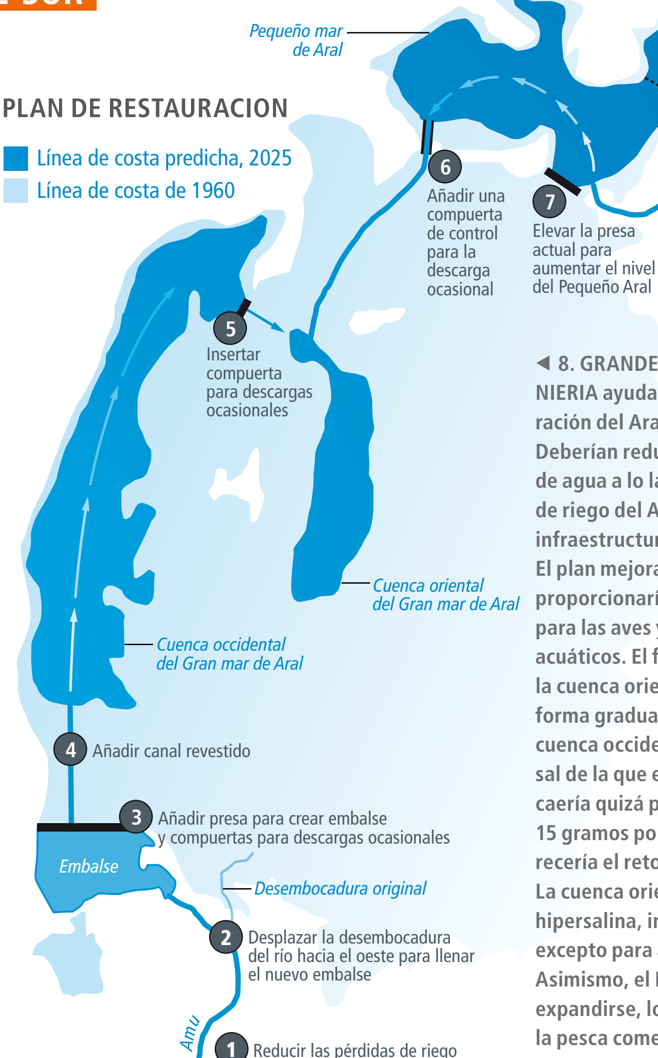
APUESTA ARRIESGADA PARA EL SUR

El Gran Aral se enfrenta a un futuro difícil. Continúa reduciéndose con celeridad. Sólo un canal largo y estrecho conecta la cuenca oriental somera con la occidental, más profunda, y éste podría cerrarse. Si los países que recorre el Amu no toman ninguna medida, al ritmo actual de entradas procedentes de las aguas freáticas y salidas por evaporación, se estabilizaría una cuenca oriental aislada en una superficie de 4300 km². Pero tendría sólo una profundidad media de 2,5 metros. La salinidad superaría los 100 g/l, alcanzando quizá los 200 g/l; los únicos organismos que vivirían allí serían artemias y bacterias.

El destino de la cuenca occidental depende de la entrada de aguas subterráneas, cuya cuantía resulta incierta. Uno de los autores (Aladin) ha señalado la presencia de numerosos manantiales de agua dulce en los acantilados occidentales. De acuerdo con nuestros cálculos, la cuenca se estabilizaría en unos 2100 km². El lago seguiría siendo profundo: alcanzaría los 37 metros en algunos puntos. Pero la salinidad subiría por encima de los 100 g/l.

Si se realizaran grandes obras de ingeniería se rehabilitaría parcialmente la cuenca occidental. Podría llevarse a cabo un viejo proyecto que Micklin, otro de los firmantes, ha recuperado. Si bien su coste sería muy elevado, requeriría sólo un incremento modesto del caudal del Amu, que se conseguiría mediante una mejora razonable del sistema de irrigación en la cuenca de drenaje. La recuperación de los humedales constituye otro de los objetivos principales.

La Unión Soviética empezó esas obras a finales de los años ochenta. Uzbekistán ha continuado el proyecto con ayuda internacional. La biodiversidad, las pesquerías y el filtrado natural de las aguas residuales (que realiza la vegetación acuática) han mejorado marginalmente. Pero no existen soluciones rápidas para ese problema. El Aral se ha estado desecando durante más de 40 años. Un desarrollo sostenible y a largo plazo requerirá no sólo importantes inversiones e innovaciones técnicas, sino también cambios políticos, sociales y económicos radicales.



◀ **8. GRANDES OBRAS DE INGENIERIA ayudarían a la recuperación del Aral sudoccidental. Deberían reducirse las pérdidas de agua a lo largo de los canales de riego del Amu y construirse las infraestructuras que se indican. El plan mejoraría el clima local y proporcionaría tierras adecuadas para las aves y los mamíferos acuáticos. El flujo de salida hacia la cuenca oriental reduciría de forma gradual la salinidad de la cuenca occidental, al llevarse más sal de la que entraría; la salinidad caería quizá por debajo de los 15 gramos por litro, lo que favorecería el retorno de los peces. La cuenca oriental se tornaría hipersalina, inhóspita para la vida excepto para artemias y bacterias. Asimismo, el Pequeño Aral podría expandirse, lo que reanimaría la pesca comercial y el cabotaje desde Aralsk.**

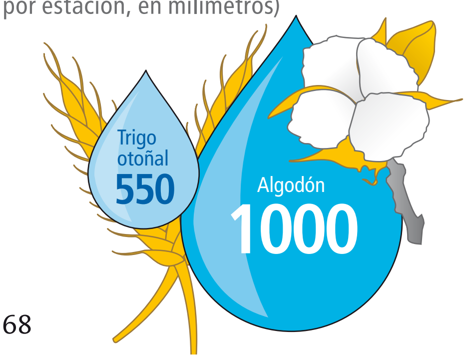
DAVID TURNLEY *Corbis*



▲ **9. EL ALGODON consume gran parte del agua de riego de la región. Sustituirlo por cultivos menos sedientos, como el trigo otoñal, ahorraría el agua que se necesita perentoriamente para revivir el mar de Aral. Sin embargo, los países de la cuenca basan en el algodón su obtención de divisas.**

EFECTO DE LOS CULTIVOS EN EL USO DEL AGUA

(pluviometría e irrigación necesarias por estación, en milímetros)



IMPLICACIONES GLOBALES

El mar de Aral se consideraba, hasta hace poco, un caso perdido. Sin embargo, la recuperación de la parte septentrional demuestra que es posible mejorar la productividad ecológica y económica de ciertas regiones de lo que antaño fue un gran lago. La historia del Aral ilustra la enorme capacidad de las sociedades modernas para causar estragos en el mundo natural y en su propia gente; pero demuestra también el gran potencial para restaurar el entorno natural. A otras masas de agua del planeta les espera un destino semejante: el lago Chad, en Africa Central, y el mar de Salton, en el sur de California. Esperamos que la experiencia del mar de Aral sirva para otras situaciones. Estas son algunas de las lecciones aprendidas:

- El hombre arruina muy deprisa el ambiente natural. Su recuperación, por contra, constituye un proceso largo y arduo. Debe evaluarse con cautela el impacto de cualquier intervención en los sistemas naturales antes de acometer ninguna acción, algo que no se hizo en la Unión Soviética.
- Evitar los problemas graves en el presente no es garantía para el futuro. El riego intensivo aplicado durante siglos en la cuenca del mar de Aral no dañó gravemente el lago hasta los años sesenta del siglo pasado; sin embargo, la expansión ulterior de los regadíos hizo que el sistema hidrológico de la región sobrepasara el punto de sostenibilidad.
- Hay que ser precavido ante las soluciones rápidas para problemas ambientales y humanos complejos. La reducción de la producción de algodón haría llegar más agua al mar, pero dañaría la economía, aumentaría el desempleo y generaría tensiones sociales. El desarrollo sostenible requiere no sólo dinero e innovación, sino también viabilidad política, social y económica.
- El medio natural es asombrosamente adaptable. No deben abandonarse la esperanza ni los esfuerzos para salvarlo. Muchos expertos dieron por sentenciado y perdido el mar de Aral, pero estamos asistiendo a la restauración de partes sustanciales del mismo.



▲ **10. TILAPIAS MUERTAS** abarrotan la ribera del mar de Salton, en California (*arriba*), que cada vez se hace más salado debido a la ineficacia de los sistemas de riego. Se están considerando varios planes para reducir la salinidad del lago antes de que desaparezcan todos los peces. En Africa, el lago Chad (*abajo*) se ha reducido hasta la décima parte de su tamaño desde los años sesenta debido a la extensión del riego. Los agricultores, los ganaderos y los habitantes de los cuatro países ribereños protagonizan enfrentamientos por el control de la poca agua que queda (*abajo a la derecha, azul*), de sólo 1,5 metros de profundidad.





WORLD SAT (*fotografías aéreas del lago Chad*); JAY CALDERON *The Desert Sun* (*tilapias muertas*)

Los autores

Philip Micklin y **Nikolay V. Aladin** han realizado varios estudios de campo en el mar de Aral a lo largo del último decenio. Micklin es profesor emérito de geografía en la Universidad de Michigan Occidental. Aladin dirige el Laboratorio de Aguas Salobres del Instituto de Zoología de la Academia de Ciencias de Rusia, en San Petersburgo.

Bibliografía complementaria

HYDROBIOLOGY OF THE ARAL SEA. Dirigido por Nikolay V. Aladin *et al. Dying and Dead Seas: Climatic vs. Anthropic Causes*. NATO Science Series IV; Earth and Environmental Sciences, vol. 36. Kluwer, 2004.

THE ARAL SEA DISASTER. Philip Micklin en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 35, págs. 47-72; 2007.

Plasmas fríos

Los plasmas fríos se encuentran lejos del equilibrio térmico: los electrones, iones y átomos neutros que los constituyen tienen temperaturas diferentes. Esto confiere a los plasmas fríos unas propiedades de gran interés aplicado

Francisco José Gordillo Vázquez

La primera vez que la palabra *plasma* apareció impresa en un texto científico relacionado con el estudio de las descargas eléctricas en gases data de 1928. Irving Langmuir publicó ese año su artículo *Oscilaciones en gases ionizados* en las Actas de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos. Fue el bautizo del estado de la materia predominante en el universo conocido (se estima que hasta el 99 % de la materia es plasma), aunque no en nuestro planeta, donde las condiciones de presión y temperatura hacen que nos parezcan comunes los estados de la materia —sólido, líquido y gaseoso— que en términos globales son exóticos.

Basta añadir energía al sólido (en forma de calor o de radiación electromagnética) para pasar al estado líquido, a partir del cual se obtiene gas mediante un aporte adicional de energía. Si seguimos añadiendo energía al gas lo ionizaremos parcial o totalmente, esto es, arrancaremos electrones de los átomos o moléculas que lo constituyen. Alcanzamos de esa forma un nuevo estado de la materia, el plasma, constituido por electrones libres, átomos y moléculas (partículas eléctricamente neutras) e iones (dotados de carga eléctrica positiva o negativa).

La energía necesaria para generar un plasma puede suministrarse de varias maneras: mediante el calor originado en un proceso de combustión, mediante la interacción entre radiación láser y un sólido, líquido o gas, o mediante descargas eléctricas en gases, en las que los electrones libres toman energía del campo eléctrico aplicado y la pierden en procesos de excitación e ionización de los átomos y moléculas del gas.

La luz emitida por un plasma, su espectro de emisión característico, viene determinada por el tipo de átomos, moléculas e iones que lo forman. Estos componentes, al desexcitarse, emiten radiación electromagnética, visible o no. Una de las peculiaridades de los plasmas es que conducen la electricidad. A escala macroscópica, los plasmas son, no obstante, eléctricamente neutros, ya que el número de cargas positivas y negativas es similar. Así, la llama producida por la combustión de la cera de una vela con el oxígeno del aire —ejemplo habitual de plasma muy poco ionizado— puede conducir la electricidad.

El estudio de fenómenos naturales comunes en nuestro mundo nos ha enseñado que los rayos, las auroras, la ionosfera y las descargas eléctricas recientemente descubiertas en la alta atmósfera (entre 50 y 90 km de altura) son distintos tipos de plasmas naturales presentes en la envoltura gaseosa de nuestro planeta. Más allá de la Tierra, hay plasmas en el Sol y las demás estrellas, en el viento solar, en la cola de los cometas y en el espacio interestelar.

Las primeras observaciones relacionadas con los plasmas se remontan a los experimentos de Georg Christoph Lichtenberg, profesor de la Universidad de Gotinga en el último tercio del siglo XVIII y hoy más recordado como escritor. Al situar un material aislante entre un electrodo puntiforme y una placa metálica, y someterlo a una elevada tensión electrostática, observó unos bellos patrones radiantes con formas arborescentes. Tales patrones obedecían a la ruptura dieléctrica del material. Los primeros intentos de explicar las observaciones de Lichtenberg se deben a Michael Faraday, quien dedicó algunos años de su vida (1816-1819) al estudio de las características de la materia cuando aumentaba su temperatura, aunque no llegó a dilucidar la posible existencia de un nuevo estado de la materia más allá del gaseoso.

Otro físico inglés, William Crookes, descubrió en 1879 una "materia radiante" de color

CONCEPTOS BASICOS

- Cuando se habla de plasmas —gases de iones, electrones libres y, si la ionización no es perfecta, partículas neutras—, se suele pensar en los sumamente calientes de que están hechas las estrellas. Sin embargo, en los plasmas fríos iones y partículas neutras tienen una temperatura de sólo unas decenas de grado. Los electrones, en cambio, se encuentran a muchos miles de grados.
- Las numerosas aplicaciones industriales de los plasmas fríos sacan partido de la gran diferencia de energía entre las especies que los constituyen.
- La lámparas de bajo consumo, la tinción del algodón, la inscripción de patrones en obleas de silicio o el tratamiento de superficies son algunas de esas aplicaciones.

FRANCISCO JOSE GORDILLO VAZQUEZ



1. UNA LLAMA ES UN EJEMPLO DE GAS parcialmente ionizado que conduce la electricidad. El color rojo anaranjado se debe a la luz emitida por partículas de ceniza que ascienden por convección; el intenso azul de la base de la llama es consecuencia de procesos de desexcitación radiativa del oxígeno.

2. LOS RAYOS SON PLASMAS FRIOS muy ionizados. En la foto se muestra un rayo negativo, esto es, producido entre una nube con carga eléctrica negativa y el suelo, entre los que llega a existir una diferencia de potencial eléctrico de hasta 100.000 volt. El 95 % de los rayos son de este tipo.

FRANCISCO JOSE GORDILLO VAZQUEZ

verde, con patrones estriados, que aparecía al aplicar voltajes entre unos electrodos instalados dentro de un tubo de vidrio, relleno sólo con el aire que quedaba tras haber hecho un cierto vacío. Además, cerca del cátodo observó una región oscura, la zona oscura de Crookes. Estas observaciones le llevaron a postular la existencia de un cuarto estado de la materia. Conjeturó que estaba formado por moléculas de gas dotadas de carga eléctrica, es decir, por iones. Antes de estos trabajos, en 1857, Werner von Siemens ya había patentado un proceso industrial que se valía de plasmas para la producción de ozono: un flujo de oxígeno atravesaba una descarga eléctrica anular entre dos electrodos concéntricos, uno de los cuales llevaba adherido un material aislante a modo de barrera dieléctrica. Aunque Siemens ignoraba las razones científicas últimas en las que se basaba su método, le resultó muy eficiente y rentable.

Los trabajos de J. J. Thomson sobre los rayos catódicos en descargas eléctricas en gases y su descubrimiento del electrón en 1897 le merecieron la concesión del Nobel de física de 1906. La suya fue una contribución notable al conocimiento de la estructura de los átomos (compuestos por un núcleo positivo y electrones cargados negativamente), y con ello ayudó, de paso, a aclarar la naturaleza de los plasmas. El primer intento de dar una visión global de la física de las descargas en gases se debe a Johannes Stark y a su libro titulado *Elektrizität in Gasen*, publicado en Alemania en 1902.

Tipos de plasmas

Clasificar la diversidad de tipos de plasmas que existen en la naturaleza o que se pueden generar de forma artificial no es fácil, ya que resulta arriesgado escoger parámetros aislados que nos sirvan de criterio para establecer las diferencias. Pese a tales dificultades, podemos aventurarnos en una primera clasificación de los tipos de plasmas que atienda a su equilibrio térmico, es decir, a si la temperatura o energía media de las partículas que lo forman es o no la misma para cada tipo de partícula.

Todas las partículas tienen la misma temperatura (equilibrio térmico) en el caso del plasma de los interiores estelares o de sus análogos terrestres, los plasmas termonucleares de deuterio, tritio e impurezas de bajo número atómico (carbono) generados en los dispositivos experimentales de fusión nuclear controlada (JET, ITER). El plasma del interior estelar suele estar compuesto por una alta proporción de partículas ionizadas: el número de electrones, y de iones, es similar al de partículas neutras. Estos plasmas reciben también la denominación de *plasmas calientes* o *térmicos,* ya que la temperatura en su interior llega a alcanzar millones de grados (10^7-10^9 grados centígrados), lo mismo para electrones que para especies pesadas.

Hay otro tipo de plasmas térmicos, con ciertas aplicaciones industriales, que se generan a presiones altas, por encima de los 133 milibares (133 mbar), algo más de una décima de atmósfera, si bien sus temperaturas (10^4-10^5 grados centígrados) son mucho menores que las de los plasmas de fusión. Las antorchas de plasmas para tratamientos de superficies o las lámparas de plasmas producidos en descargas de alta intensidad para alumbrado público o faros de coches de gama alta son plasmas de ese tipo.

Cuando la presión del gas es baja o la tensión eléctrica aplicada en la descarga alta, los electrones del plasma adquieren, en el tiempo entre colisiones con otras partículas del plasma, unas energías cinéticas superiores a la energía asociada al movimiento térmico aleatorio de las partículas neutras (átomos y moléculas)



3. **ELECTRODO CENTRAL de una lámpara ornamental de plasma. El color azulado del plasma se debe a procesos de recombinación radiativa de electrones e iones, así como a la desexcitación radiativa de electrones desde estados atómicos o moleculares excitados hasta niveles con energías inferiores.**

FRANCISCO JOSE GORDILLO VAZQUEZ

del plasma. Podemos entonces atribuir cierto grado de desviación del equilibrio térmico al plasma, ya que los electrones, iones y partículas neutras tienen diferentes "temperaturas" o energías cinéticas medias. (En realidad, sólo tiene sentido hablar de temperatura cuando la distribución de energía de las partículas en cuestión se ciñe a una determinada función estadística, la maxwelliana. No suele ser ése el caso en los plasmas producidos a baja presión y con un grado de ionización pequeño, entre 10^{-6} y 10^{-4}.)

Los plasmas no térmicos, conocidos también por *plasmas fríos*, se caracterizan por el hecho de que la temperatura de las especies pesadas (las partículas neutras y los iones) es cercana a la temperatura ambiente (25-100 grados centígrados). La temperatura electrónica es, en cambio, mucho mayor (entre 5000 y 10^5 grados centígrados). Los plasmas fríos suelen producirse a baja presión ($p < 133$ mbar) en reactores con muy diversas geometrías. Tales reactores generan plasmas mediante sistemas de corriente continua, radiofrecuencia, microondas o en descargas pulsadas.

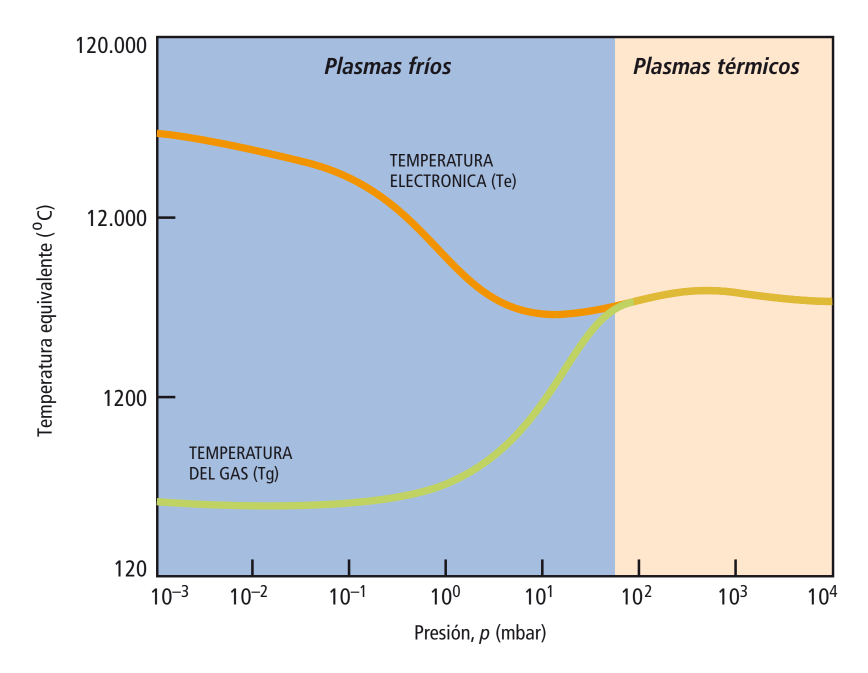
Existen tipos especiales de plasmas fríos, producidos en descargas llamadas de corona y de barrera dieléctrica, que se generan a *presión atmosférica* mediante la utilización de pulsos de entre 10^{-6} s y 10^{-9} s. En esos tipos de descargas se producen electrones muy energéticos que, debido a la brevedad de los pulsos utilizados, apenas tienen tiempo de intercambiar energía con su entorno. De ese modo se establece un fuerte gradiente de temperatura entre los electrones y las especies pesadas del plasma.

Los valores de la densidad y de la temperatura electrónica, dos de los principales parámetros que caracterizan a los plasmas, cubren un amplísimo espectro. Así, la densidad electrónica varía entre uno y 10^{25} electrones por centímetro cúbico; es decir, llega incluso a superar la concentración de electrones en metales. Por otro lado, el recorrido libre medio de las partículas en un plasma, es decir, la distancia media cubierta antes de colisionar con otra partícula del plasma, puede extenderse desde decenas de millones de kilómetros hasta sólo unas micras.

Plasmas fríos en la industria

Los plasmas fríos resultan muy útiles para muchas aplicaciones técnicas porque, al no encontrarse en equilibrio térmico, es posible controlar la temperatura, por una parte, de las especies iónicas y neutras y, por otra, de los electrones. Sin embargo, la elevada energía de los electrones constituye el genuino factor determinante a la hora de iniciar muchas reacciones químicas que, en medios activados térmicamente, resultarían muy ineficientes, si no imposibles.

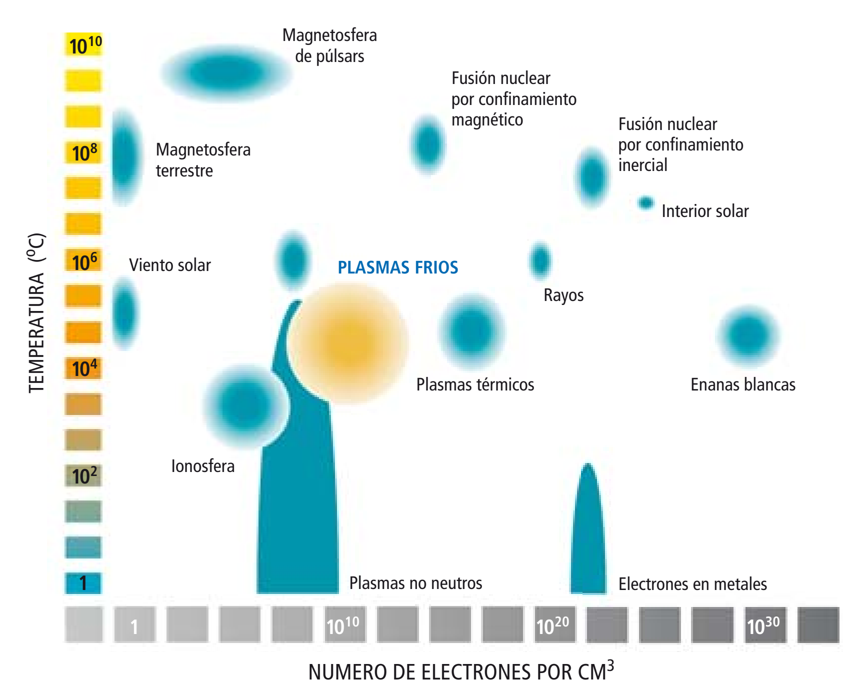
Las aplicaciones industriales de los plasmas fríos conforman una parte muy importante de la infraestructura productiva de los países avanzados. En los plasmas fríos se generan un



4. VARIACION DE LAS TEMPERATURAS equivalentes de los electrones (T_e) y partículas pesadas (T_g) en un plasma de argón en función de la presión. En los plasmas fríos, T_e y T_g son muy distintos; en cambio, en los plasmas térmicos son prácticamente iguales.

gran número y diversidad de especies reactivas muy energéticas que activan procesos físicos y químicos difíciles de conseguir en entornos químicos ordinarios. Entre esas especies se encuentran fotones en el rango visible y en el *ultravioleta*, partículas cargadas (electrones e iones), especies neutras muy reactivas, como los radicales libres o los átomos de oxígeno, flúor y cloro, especies atómicas y moleculares excitadas, excímeros y monómeros. (Un excímero es una molécula electrónicamente excitada que carece de estado fundamental estable; un monómero es una subunidad química muy reactiva que puede unirse a otras iguales para formar polímeros.)

Gracias a los plasmas fríos, ciertos procesos industriales se realizan de forma más eficiente y barata, con lo que se reducen la contaminación y los residuos tóxicos generados. Las ventajas del uso industrial de plasmas fríos quedan perfectamente ilustradas en la comparación que W. Rakowski publicó en 1989 entre los recursos necesarios para teñir tejidos de algodón con un método químico corriente, que use cloro, y los que requieren un procedimiento igualmente eficaz, pero que se vale de plasmas fríos a baja presión (2,5-7 mbar). La modificación de 120 toneladas/año de lana mediante el segundo método suponía un ahorro de 27.000 m^3 de agua, 44 toneladas de hipoclorito sódico, 16 toneladas de bisulfito sódico, 11 toneladas de ácido sulfúrico y 685 megawatt de potencia eléctrica. Por otra parte, el proceso químico ordinario producía residuos tóxicos causantes de diferentes enfermedades en los trabajadores. La comparación de los costes energéticos de producir un kilogramo de tejidos de lana teñible arrojaba unas cifras de 7 kilowatt/kg para el proceso de clorado tradicional frente a sólo 0,3 o 0,6 kilowatt/kg cuando se recurre al tratamiento con plasmas fríos producidos a baja presión.



5. DISTINTOS TIPOS DE PLASMAS, clasificados por los valores de dos de sus magnitudes más características: el número de electrones por centímetro cúbico y la energía electrónica media (la temperatura electrónica, cuando se trata de plasmas en equilibrio).

Química de plasmas fríos

La química de los plasmas fríos, o *química fría*, así llamada por la baja temperatura (en general inferior a los 100 grados centígrados) de las especies pesadas del plasma, puede ser de tipo homogéneo o de tipo heterogéneo. Será de tipo homogéneo cuando las reacciones se produzcan en fase gaseosa como en la síntesis de ozono o en la eliminación de sulfuros y nitruros presentes en gases residuales. Será de tipo heterogéneo, cuando el plasma interacciona con una superficie sólida o líquida.

En los procesos de interacción plasma-superficie sólida se reconocen tres categorías: erosión, depósito y alteración fisicoquímica. Por erosión se entiende el desgaste asistido por plasma, de una superficie mediante bombardeo iónico simultáneo. Tiene un enorme interés para la industria microelectrónica porque erosiona el material de modo anisótropo, es decir, con una anchura y altura diferentes; lo propio de las técnicas químicas ordinarias es el tallado isótropo. En los procesos de depósito químico en fase vapor asistido por plasma se añade material a la superficie en forma de una capa delgada. Por último, las superficies sólidas tratadas con plasmas experimentan cambios fisicoquímicos como efecto de los procesos

FRANCISCO JOSE GORDILLO VAZQUEZ

de radiación y de las partículas procedentes del plasma que actúan sobre ella.

El interés científico y técnico por los procesos de interacción plasma-superficie surgió a raíz de un trabajo de Jerome Goodman, publicado en 1960. Exponía que el depósito de una lámina de material a partir de un plasma podía resultar útil y no sólo un residuo molesto. En concreto, Goodman observó que el depósito de una micra de espesor de estireno polimerizado por plasma presentaba propiedades dieléctricas valiosas. Desde ese momento, la síntesis de materiales poliméricos bajo la influencia de plasmas fríos, o polimerización por plasma, dejó de ser un subproducto indeseable, observado ya en 1874 por De Wilde y Thenard, para convertirse en uno de los tratamientos de materiales por plasma con mayor número y diversidad de aplicaciones.

Los plasmas producidos en descargas de tipo corona a presión atmosférica se han utilizado para el tratamiento superficial de materiales, aunque, debido a que son muy inhomogéneos, se los ha ido sustituyendo poco a poco por plasmas generados en descargas luminiscentes a baja presión (entre 0,013 mbar y 13 mbar). Sin embargo, en los últimos quince o veinte años también han empezado a emplearse descargas de barrera y luminiscentes que generan plasma fríos a presiones atmosféricas en régimen homogéneo, lo cual los hace muy prácticos, y económicamente competitivos frente a los producidos a baja presión, en muchos procesos que recurren a los plasmas fríos para el tratamiento de grandes superficies.

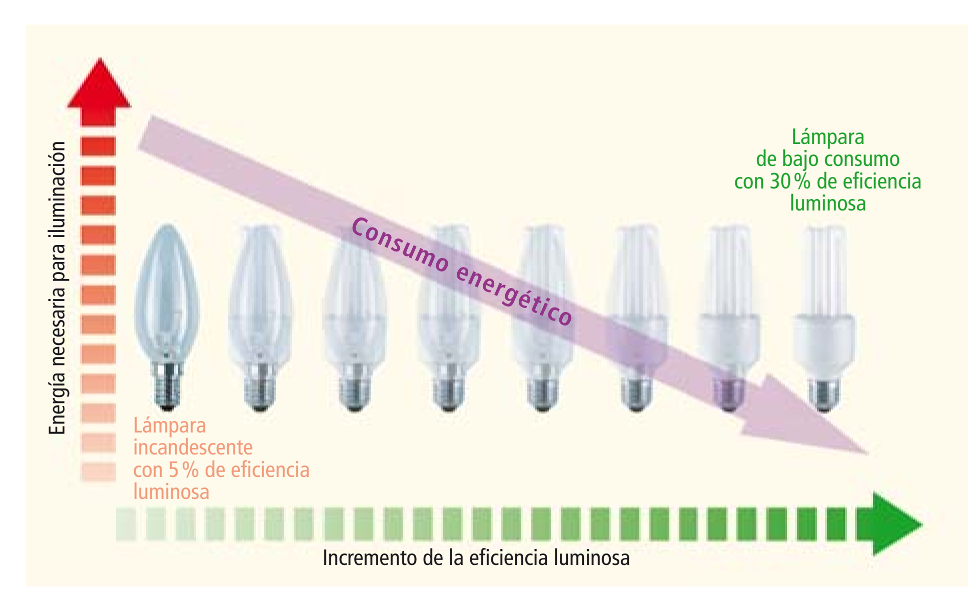
Microelectrónica

Desde mediados de los sesenta del siglo xx, la intensa demanda, por la industria microelectrónica, de circuitos con escalas de integración cada vez mayores ha sido el estímulo principal para el desarrollo de los métodos de tratamiento de superficies y de materiales en capa delgada por plasma. Así, el erosionado seco asistido por plasma, que posibilitó la creación masiva de patrones anisótropos sobre obleas de silicio, evolucionó en los años setenta. Además, durante ese mismo decenio empezó a ser común que en las cadenas de producción de circuitos integrados se utilizasen ciertos métodos de diagnosis del plasma, entre ellos la espectroscopía óptica de emisión, que, con la intención última de controlar y optimizar la fabricación, permitieron profundizar en el conocimiento de la cinética del plasma y de los mecanismos de erosionado y depósito. Las técnicas de diagnosis del plasma se utilizaron de manera conjunta con las nuevas herramientas que aparecieron por entonces para el análisis de las superficies, como la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X o la espectroscopía de electrones Auger.

A principios de 2006, Intel anunció la comercialización de un nuevo microprocesador basado en una técnica de integración que ha conseguido dimensiones de sólo 45 nm en los elementos de los circuitos. Tal grado de miniaturización no habría sido posible sin una inversión sustancial en investigación dedicada a optimizar los tres tipos de procesos basados en plasmas fríos antes mencionados. Hoy, hasta dos tercios de las etapas involucradas en el proceso de fabricación de semiconductores se basa en el uso de plasmas fríos. Lejos de alcanzar una situación estable, la tendencia crece a ritmo constante e incluso se extiende a sectores industriales relacionados; por ejemplo, el de la producción de células fotovoltaicas mediante la síntesis de láminas delgadas de silicio amorfo o microcristalino con técnicas de depósito asistido por plasma de láminas finas.

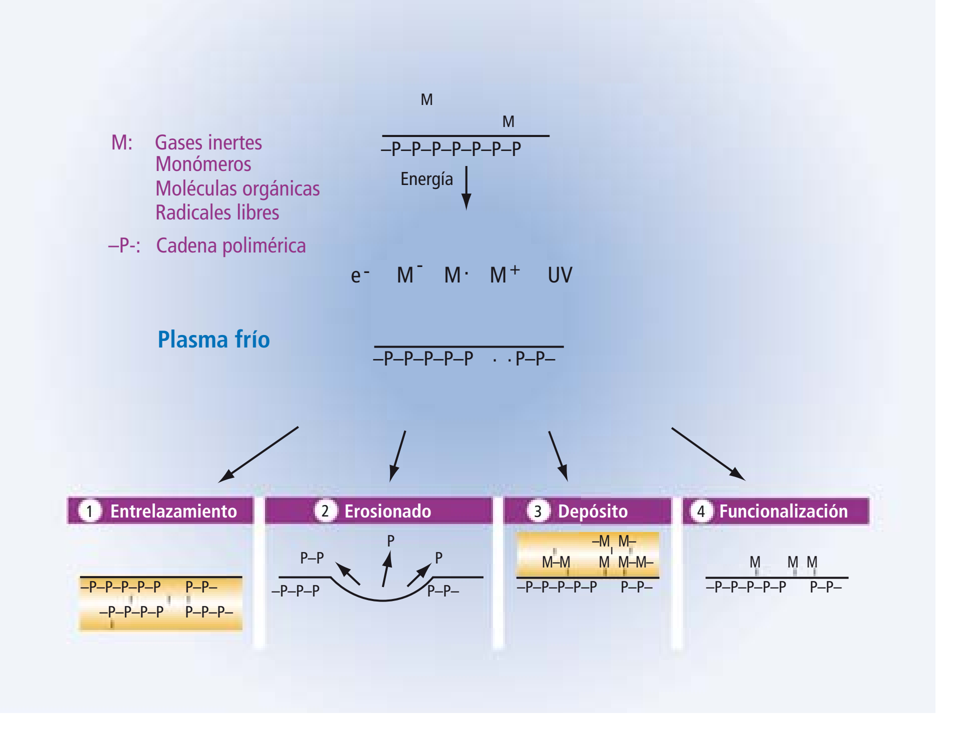
Por otro lado, el uso de microplasmas, como los producidos en microdescargas de cátodo hueco, permite realizar en una hora millones de microagujeros (de unas 50 micras de diámetro) en placas de circuitos integrados;

6. DIBUJO ESQUEMATICO con los diferentes tipos de radiación y de partículas que se pueden encontrar en un plasma de oxígeno, uno de los más utilizados en aplicaciones y en investigación fundamental.



7. EL USO DE LAMPARAS DE PLASMA de última generación supone un importante ahorro de consumo energético.

FRANCISCO JOSE GORDILLO VAZQUEZ



8. LAS PARTICULAS de un plasma frío pueden interactuar con una superficie polimérica, lo que da lugar a diferentes tipos de tratamientos de la superficie en cuestión.

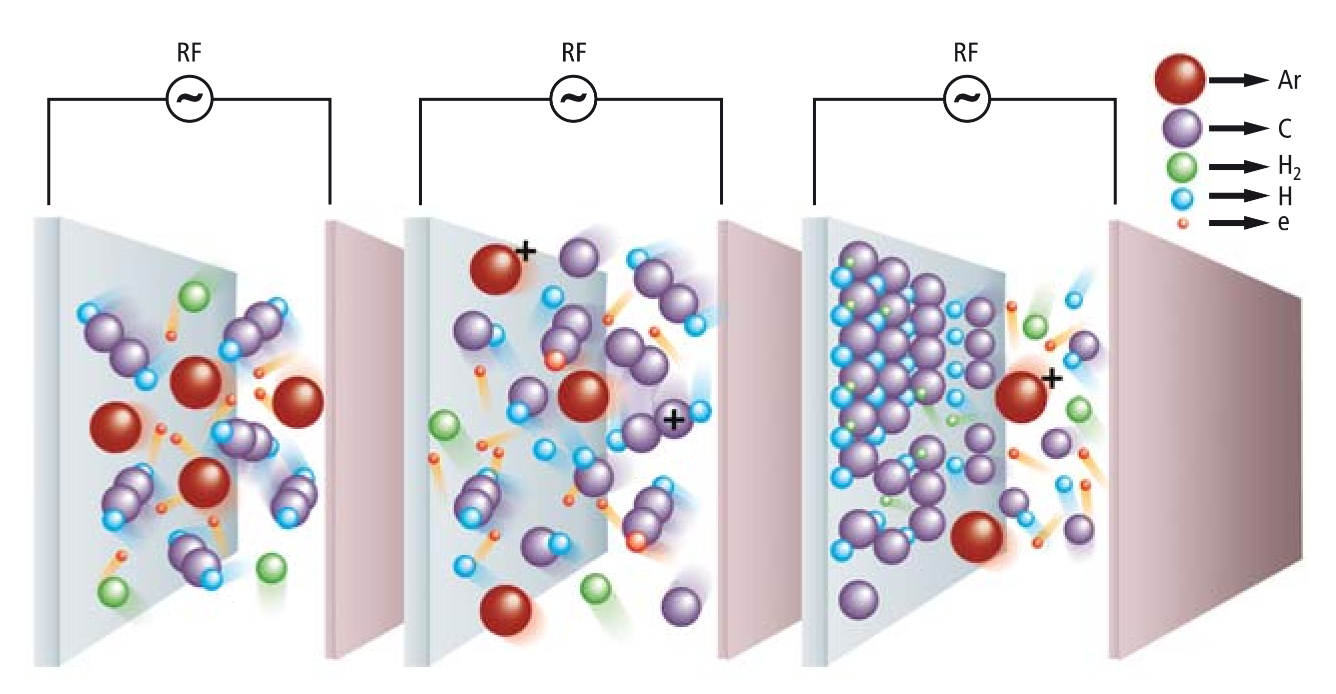
se aumenta así sensiblemente la densidad de componentes en los circuitos de dispositivos microelectromecánicos.

Nuevas fuentes de luz

Las lámparas modernas que iluminan los lugares donde trabajamos y vivimos constituyen un ejemplo brillante del efecto de los plasmas fríos en nuestro entorno inmediato. La luz natural, procedente del plasma solar, es la "mejor" para el ojo humano, que manifiesta su sensibilidad máxima en la zona verde del espectro visible, alrededor de los 555 nm. En este rango espectral se encuentra también el máximo rendimiento luminoso posible de una fuente de luz blanca que proporcione 683 lúmenes por watt de potencia eléctrica.

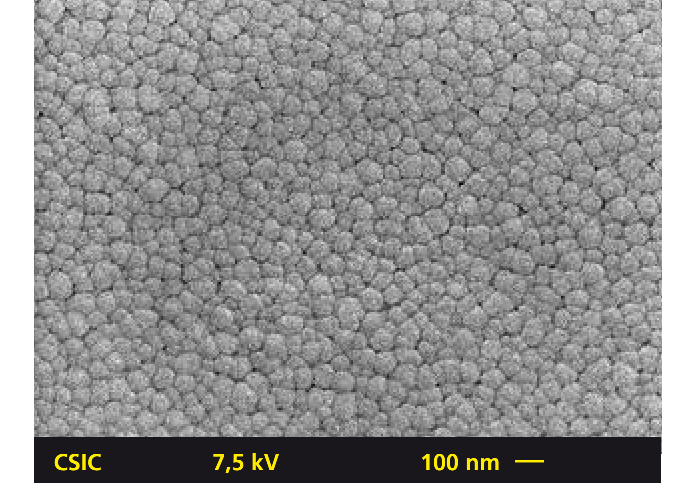
A la luz producida artificialmente se le pide que reproduzca los colores que genera la luz natural. A lo largo de los años se han ido desarrollando diferentes tipos de lámparas con el objeto de alcanzar valores del rendimiento luminoso lo más cercanos posible al valor teórico máximo. En 1938 ya se pensó en aplicar campos eléctricos alternos para generar, con un mínimo consumo energético, descargas eléctricas en un gas fácilmente excitable contenido en un tubo de vidrio. Ese gas mezcla una pequeña cantidad de vapor de mercurio con un gas inerte, casi siempre argón, a una presión que suele ser del 0,5 % de la atmosférica. Sin embargo, los átomos de mercurio excitados emiten sobre todo luz ultravioleta (UV), invisible: por tanto, para conseguir un alumbrado que pueda captar el ojo humano se recubre el interior de los tubos con un material fluorescente que absorbe la radiación UV y emite luz visible. De ahí que este tipo de alumbrado recibe desde entonces el nombre de tubos fluorescentes.

Uno de los mayores avances de las lámparas basadas en plasmas fríos se dio con la aparición de las lámparas de bajo consumo. Eran los años ochenta del siglo XX. A grandes rasgos, se trata de tubos fluorescentes pequeños que incorporan unos conversores



9. PLASMA FORMADO POR LA MEZCLA de acetileno (C_2H_2), argón (Ar) e hidrógeno molecular (H_2), útil en la síntesis de nanoestructuras de carbono mediante el depósito químico en fase vapor asistido por plasma. De izquierda a derecha se aprecian los distintos grados de activación del plasma, desde una primera etapa donde los electrones (e) comienzan a ionizar y disociar los átomos y moléculas del plasma, hasta una última secuencia en la que se aprecia el depósito de átomos de carbono sobre un substrato.





10. IMAGEN TOMADA POR MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO de partículas de carbono sintetizadas en laboratorios del CSIC a partir de un plasma de acetileno (1 %)-argón (95 %)-hidrógeno (4 %) producido en un reactor de radiofrecuencia (13,56 MHz) a 300 W y una presión de 0,015 mbar. Estas nanoestructuras de carbono presentan propiedades parecidas a las del polvo interestelar carbonáceo. De hecho, en ciertas investigaciones sirven de análogas de laboratorio del polvo interestelar.

de voltaje y frecuencia que proporcionan a la lámpara una tensión alterna, de entre 30 y 70 kilohertz, más adecuada para la generación del plasma en el interior de la lámpara. Ni siquiera con tales mejoras, el rendimiento luminoso de las lámparas de bajo consumo de plasma frío supera los 100 lúmenes por watt de potencia eléctrica, es decir, sólo una séptima parte del límite teórico (683 lúmenes/watt), aunque sensiblemente mayor que el de las lámparas incandescentes tradicionales (10-18 lúmenes/watt), sus variantes halógenas (20-25 lúmenes/watt) o el de los tubos fluorescentes (40-70 lúmenes/watt).

La investigación actual en lámparas de plasma frío persigue reducir su consumo energético y hacerlas más compatibles con el ambiente, eliminando el mercurio de su interior. Ya existen lámparas de plasmas fríos sin mercurio; lo sustituyen con un plasma de excímeros. Los excímeros emiten cuando se desexcitan una radiación ultravioleta casi monocromática, con longitudes de onda que van de los 308 nanómetros hasta los 172 nm. Uno de los problemas actuales radica en encontrar el recubrimiento fluorescente adecuado para optimizar la conversión de esta luz ultravioleta en visible. Mientras ese momento llega, las lámparas de excímeros encuentran ya otras muchas aplicaciones, por ejemplo en la fotoactivación química que endurece tintas impresas. Como la iluminación con lámparas de plasmas de excímeros apenas calienta la superficie, resulta compatible con los materiales termosensibles.

Tratamientos superficiales con plasmas fríos

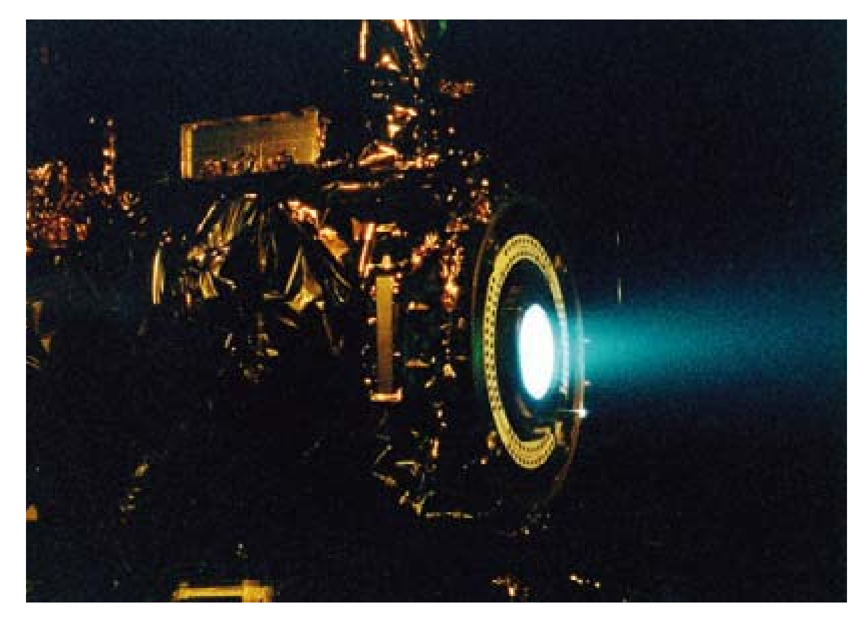
La energía y la carga eléctrica de las partículas que constituyen un plasma cambian bruscamente cuando entran en contacto con superficies sólidas. Se transfiere energía a las superficies. Por una parte, los plasmas pueden activar una superficie, esto es, hacer que las moléculas de ésta se enlacen con componentes moleculares de otras sustancias; por otra, eligiendo adecuadamente los gases con que se generan los plasmas, éstos servirán para recubrir la superficie con un determinado material.

En general, al tratar una superficie con un plasma frío se persigue su activación. Un ejemplo de activación superficial por plasma es la humidificación de fibras de algodón, que mejora la capacidad adhesiva de las moléculas de los tintes, lo cual permite disponer de tejidos con colores de más calidad. Además, la propia tinción se desarrolla con mayor rapidez que a través de métodos químicos ordinarios.

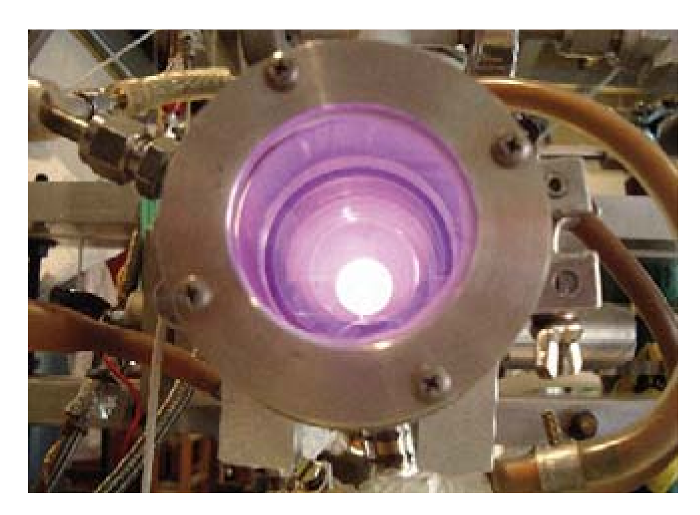
La capacidad que poseen los plasmas fríos de modificar las superficies se debe a varios factores. Uno de ellos es la elevada energía media de los electrones libres presentes en el plasma (1 eV-10 eV), suficiente para romper enlaces químicos. Asimismo, las características únicas de los tratamientos superficiales mediante plasmas fríos dimanan de los efectos producidos sobre la superficie por los fotones y especies activas procedentes del plasma, que sólo penetran hasta una profundidad de entre algunos cientos de ángstroms ($\sim 10^{-10}$ m) y unas 10 micras. Debido a esto, las propiedades del interior del material permanecen inalteradas.

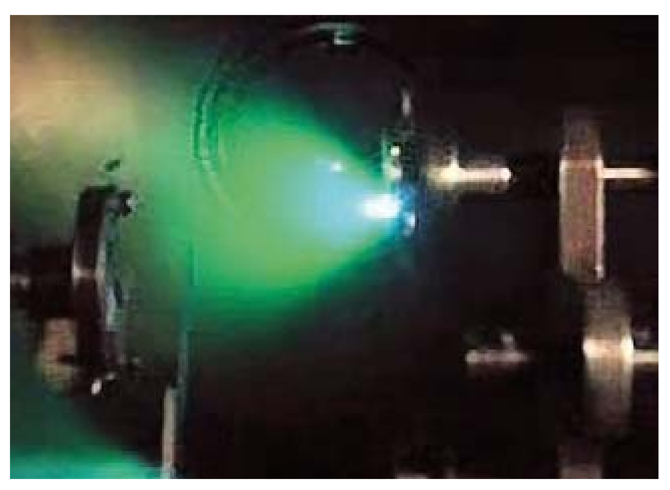
El tratamiento de superficies con plasmas fríos permite una activación funcional, o “funcionalización”, de las superficies, cosa que los

11. MOTOR IONICO utilizado por vehículos espaciales para su correcto posicionamiento en una órbita determinada, el desplazamiento entre órbitas y la propulsión en el espacio interplanetario y profundo. La luz azulada proviene de la desexcitación radiativa de los iones de xenón expulsados por la tobera del motor iónico.



FRANCISCO JOSE GORDILLO VAZQUEZ





FRANCISCO JOSE GORDILLO VAZQUEZ

12. PLASMAS PRODUCIDOS EN DIFERENTES institutos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. La foto de la izquierda muestra un plasma de aire generado en el Instituto de Estructura de la Materia mediante una descarga eléctrica de corriente continua a baja presión, de interés para estudios del plasma de la ionosfera terrestre. En la foto de la derecha aparece un plasma producido en el Instituto de Optica mediante la ablación con un láser de excímeros de un blanco de plata. Este plasma se genera durante el proceso de depósito asistido por láser pulsado con que se sintetizan materiales nanoestructurados de utilidad en fotónica.

tratamientos químicos no pueden ofrecer. Un ejemplo: el tratamiento de superficies sintéticas con un plasma de oxígeno puro genera en ella grupos hidroxilos, carbonilos y ésteres. O dicho de otro modo: promueve la formación de grupos moleculares químicamente funcionales que mejoran la adhesión interfacial y, así, la superficie tratada con un plasma de oxígeno será receptiva a posteriores tratamientos.

Estos procesos tienen hoy una importante repercusión económica en muchos sectores. La funcionalización de tejidos técnicos para hacerlos hidrófobos e impermeables a la humedad o al aceite se lleva a cabo mediante plasmas fríos generados a presión atmosférica en descargas de barrera dieléctrica. El aumento mediante plasmas fríos de la energía superficial de materiales poliméricos mejora la adherencia de ciertos recubrimientos, por ejemplo una lámina de material aislante muy fina, de unos 40 nm de espesor, que actúe a modo de barrera contra la penetración de gases y vapores.

Ciertos materiales aislantes de tipo cerámico (SiO_2) o de carbono amorfo hidrogenado reducen la tasa de penetración de gases (como el O_2 o el CO_2) o vapores, con diferentes olores, a través de los materiales poliméricos utilizados en el envasado de alimentos, bebidas o fármacos. Además, si estos plásticos tan comunes en los envases no estuvieran previamente tratados con plasmas fríos, resultaría muy difícil, si no imposible, lograr la impresión de textos o gráficos sobre ellos, ya que la tinta no se fijaría bien.

Aplicaciones médicas y biomédicas

En 1969 el grupo de John R. Hollahan demostró experimentalmente que con plasmas fríos de amoniaco o de mezclas de nitrógeno e hidrógeno se producían grupos amino (—NH_2), que, al adherirse a la superficie de diferentes tipos de polímeros, creaban materiales compatibles con la sangre. Desde entonces se ha venido investigando el empleo de plasmas fríos para optimizar la interacción entre sistemas biológicos y distintos tipos de materiales, con el objetivo último de conseguir superficies biocompatibles.

El tratamiento con plasmas fríos sólo afecta a la superficie del material tratado. Las propiedades físico-químicas, mecánicas, eléctricas y ópticas del interior del material no se ven alteradas por el plasma frío. En cambio, el uso de diferentes ácidos y disolventes químicos puede dañar la superficie de muchos plásticos y, en caso de ser absorbidos, repercuten en las propiedades del interior del material.

Algunas de las aplicaciones biomédicas de los plasmas fríos tratan de mejorar la adhesión entre dos superficies. En esa labor se requiere la intervención de intensas fuerzas interfaciales, bien a través de compatibilidad química, bien por la generación de enlaces químicos favorecidos por el tratamiento con plasmas fríos. Entre las aplicaciones que suponen una mejora de la adhesión entre dos superficies, destaca el pretratamiento de catéteres, el de componentes de bombas de diálisis y el de plásticos de bolsas de sangre o para envases de determinados fármacos.

Los materiales que están en contacto con la sangre o con proteínas necesitan de tratamientos especiales que mejoren su biocompatibilidad. Los grupos funcionales amino, obtenidos a partir de plasmas fríos de amoniaco, actúan a modo de ganchos que retienen sustancias anticoagulantes, como la heparina, que reducen el riesgo de trombosis.

En protocolos experimentales de manipulación de células y tejidos, se está ya aplicando el depósito químico en fase de vapor asistido por plasmas a sustratos biodegradables. El tratamiento con plasmas fríos del poliestireno (material polimérico del que están hechas las placas de Petri de los cultivos celulares) favorece la adherencia y crecimiento de células. Si ciertas zonas de la superficie de po-

El autor

Francisco José Gordillo Vázquez, doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Sevilla, completó su formación en el Centro de Física de Plasmas y sus Aplicaciones de Toulouse (CNRS), ahora llamada LAPLACE, y en la Universidad del Sur de California en Los Angeles. En la actualidad es científico titular adscrito al Instituto de Optica del CSIC en Madrid. Sus investigaciones se han centrado en el estudio y modelización de la físico-química de plasmas atómicos y moleculares.

liestireno no se tratan, no se les adherirán células y, por consiguiente, no se generarán las estructuras que posibilitarían la formación de tejidos biológicos completos a partir de células semilla.

Se empieza a considerar que los plasmas fríos ofrecen un método alternativo de desinfección y esterilización de material médico. En este sentido, los plasmas fríos permitirían modificar y esterilizar de forma simultánea la superficie del material biomédico. La esterilización por plasma puede ser adecuada en el caso de dispositivos sensibles a la radiación, a las altas temperaturas de las autoclaves de uso médico o cuando intervienen productos químicos agresivos.

Los obstáculos principales contra el uso comercial de plasmas fríos en el sector biomédico derivan de la falta de regulación administrativa y de la escasez de estudios sobre la reproducibilidad y validez a escalas mayores de los efectos biológicos de los plasmas fríos observados en experimentos realizados en laboratorios académicos. En cualquier caso, parece que las ventajas frente a otros métodos compensan las posibles desventajas.

Aplicaciones militares

En cuanto medio ionizado, el plasma es un buen conductor de electricidad. Una de sus aplicaciones militares, entre muchas, consiste en utilizarlo a modo de antena. Las antenas de plasma funcionan igual que las de metal, aunque presentan ciertas ventajas: al desconectarlas tras una transmisión, el plasma se torna gas neutro (argón, neón, vapor de mercurio), con resistencia eléctrica infinita. Pierde así la capacidad de interactuar con señales electromagnéticas. Una vez apagadas las antenas de plasma, ni reflejan ondas de radar (se vuelven “invisibles”), ni absorben radiación de microondas de alta potencia. Se reducen sensiblemente, por lo tanto, los efectos adversos derivados de las contramedidas de guerra electrónica.

Otra peculiaridad de las antenas de plasma estriba en que, al apagarlas, permiten a las antenas cercanas emitir o recibir señales sin las interferencias (sobre todo en transmisiones de alta frecuencia con pulsos muy cortos) causadas por elementos metálicos.

El diseño de las antenas de plasma permite utilizar pulsos extremadamente cortos, de interés en comunicaciones digitales y por radar. Además, al cambiar algunas propiedades del plasma —su densidad iónica, su impedancia o su frecuencia de resonancia—, las antenas de plasma pueden configurarse de forma dinámica en frecuencia, dirección, anchura de banda y ganancia. En general, las antenas de plasma son más pequeñas y ligeras que sus análogas de metal y, gracias a sus menores pérdidas óhmicas, más potentes y eficientes.

Otra de las aplicaciones militares de los plasmas fríos producidos en descargas eléctricas es la propulsión eléctrica mediante motores iónicos, que se utilizan en los vehículos espaciales para su posicionamiento correcto en una órbita determinada o para desplazarse de una órbita a otra, así como para la propulsión en el espacio interplanetario y profundo. Las primeras ideas sobre este sistema de propulsión las propusieron los pioneros de la exploración espacial Robert Goddard y Hermann Oberth.

En los propulsores químicos la fuerza de impulso se consigue gracias a una expansión hipersónica, a través de las toberas traseras, de una gran masa de gases calientes resultado de la combustión de un cierto combustible (sólido, líquido o híbrido). Los motores iónicos, en cambio, tienen por combustible un gas poco corrosivo, de alto peso molecular y baja energía de ionización, actualmente se usa el xenón, que se inyecta en una cámara; allí recibe una descarga eléctrica, que lo convierte en un plasma con iones de xenón.

Unas rejillas aceleradoras, entre las que se ha establecido una diferencia de potencial de cientos de volt, generan un campo eléctrico que, gracias al ventajoso cociente entre carga y masa de esos iones, los acelera hasta diez veces la velocidad conseguida por los propulsores químicos. Gracias a la mayor velocidad de los iones de los motores iónicos, éstos ejercen fuerzas de empuje igual o superiores a las conseguidas por los cohetes con propulsores químicos, pero con una cantidad de combustible hasta cinco veces menor.

Todo lo anterior redunda en una mayor vida media del vehículo espacial, una mejor capacidad de maniobra en órbita y la posibilidad de disponer de mayor instrumentación a bordo (más carga útil). La nave *Deep Space 1*, lanzada por la NASA en octubre de 1998, llevaba motores iónicos de xenón como propulsores principales. Entre sus misiones se encontraba la de probar esa forma de propulsión.

Sin embargo, los motores iónicos tienen ciertas limitaciones. Una de ellas, el debilitamiento del flujo iónico por la formación entre las rejillas aceleradoras de carga espacial, se ha superado con los nuevos propulsores iónicos de tipo Hall. La introducción de un campo magnético de unos 100 o 200 gauss crea una corriente de Hall alrededor de las líneas de ese campo. Con ello se impide la formación de carga espacial; aumenta así el tiempo de residencia de los electrones en el propulsor, con lo que aumenta el número de iones disponibles. La consecuencia final es una mejora del rendimiento del motor iónico.

Bibliografía complementaria

GAS DISCHARGE PHYSICS. Y. P. Raizer. Springer Verlag; Berlín, 1997.

INDUSTRIAL PLASMA ENGINEERING: APPLICATIONS (vol. 2). J. Reece Roth. Institute of Physics Publishing Ltd., 2001.

TEMPORAL AND SPATIAL EVOLUTION OF THE ELECTRONIC DENSITY AND TEMPERATURE OF THE PLASMA PRODUCED BY LASER ABLATION OF $LiNbO_3$. F. J. Gordillo-Vázquez, A. Perea, J. A. Chaos, J. Gonzalo y C. N. Afonso en *Applied Physics Letters*, vol. 78, págs. 7-9; 2001.

DISTINCT NONEQUILIBRIUM PLASMA CHEMISTRY OF C2 AFFECTING THE SYNTHESIS OF NANODIAMOND THIN FILMS FROM C_2H_2(1%)/H_2/AR-RICH PLASMAS. F. J. Gordillo-Vázquez y J. M. Albella en *Journal of Applied Physics*, vol. 94, págs. 6085-6090; 2003.

LAMINAS DELGADAS Y RECUBRIMIENTOS: PREPARACION, PROPIEDADES Y APLICACIONES. Dirigido por J. M. Albella. CSIC; Madrid, 2003.

INTERPLAY OF PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS IN THE PECVD AND ETCHING OF THIN FILMS. C. Cavallotti, M. Di Stanislao y S. Carrà en *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, vol. 48/49, págs. 123-165; 2005.

Nanotecnia autoalimentada

Zhong Lin Wang

Las máquinas nanométricas necesitan unas fuentes de alimentación aún más diminutas

CONCEPTOS BASICOS

- El potencial de la nanotecnia es enorme, pero tan diminutos dispositivos necesitarán unas fuentes de alimentación mejores que las pilas usuales.
- La energía desaprovechada en forma de vibraciones, incluso el pulso humano, podría brindar energía suficiente para accionar esos minúsculos artefactos.
- Se podría captar esa energía desperdiciada y alimentar con ella los dispositivos nanométricos mediante conjuntos de nanohilos piezoeléctricos.
- Los dispositivos médicos serán posiblemente las principales aplicaciones. Cargarían las pilas de los marcapasos, de modo que ya no hiciese falta reponerlas. O bien, unos nanosensores inalámbricos implantados podrían monitorizar el contenido en glucosa de la sangre de los diabéticos.

El maestro relojero que en los años veinte inventó el reloj de pulsera de cuerda automática dio con una idea genial: captar mecánicamente energía procedente del brazo en movimiento del usuario y aprovecharla para dar cuerda al reloj.

Estamos empezando a crear pequeños captadores de energía capaces de abastecer de energía eléctrica al minúsculo mundo de los dispositivos de nanoescala, donde las dimensiones se miden en milmillonésimas de metro. A esas centrales eléctricas las llamamos nanogeneradores. Tal capacidad para generar energía a escala minúscula nos permite pensar en biosensores implantables, capaces de observar continuamente el contenido en glucosa de la sangre de un paciente, en sensores extensiométricos autónomos para estructuras, para puentes por ejemplo, o en sensores medioambientales detectores de toxinas; y todos funcionando sin necesidad de pilas de recambio. Se requieren con urgencia fuentes energéticas en nanorrobótica, en los sistemas microelectromecánicos (SMEM), en la seguridad interna de los países e incluso en la electrónica personal portátil. No es fácil imaginar todas las aplicaciones que al fin podrían hallarse para esos generadores infinitésimos.

Los investigadores que van tras la generación de energía a escala miniatura siguen diversos caminos. Entre las posibilidades se cuentan el aprovechamiento de las vibraciones o movimientos aleatorios (así, los que se registran cerca de las calzadas), de los gradientes de temperatura (por ejemplo, la temperatura de la tierra viene a ser constante unos cuantos metros por debajo de la superficie), de procesos bioquímicos y de fuentes energéticas externas (ondas ultrasónicas e incluso sonidos audibles).

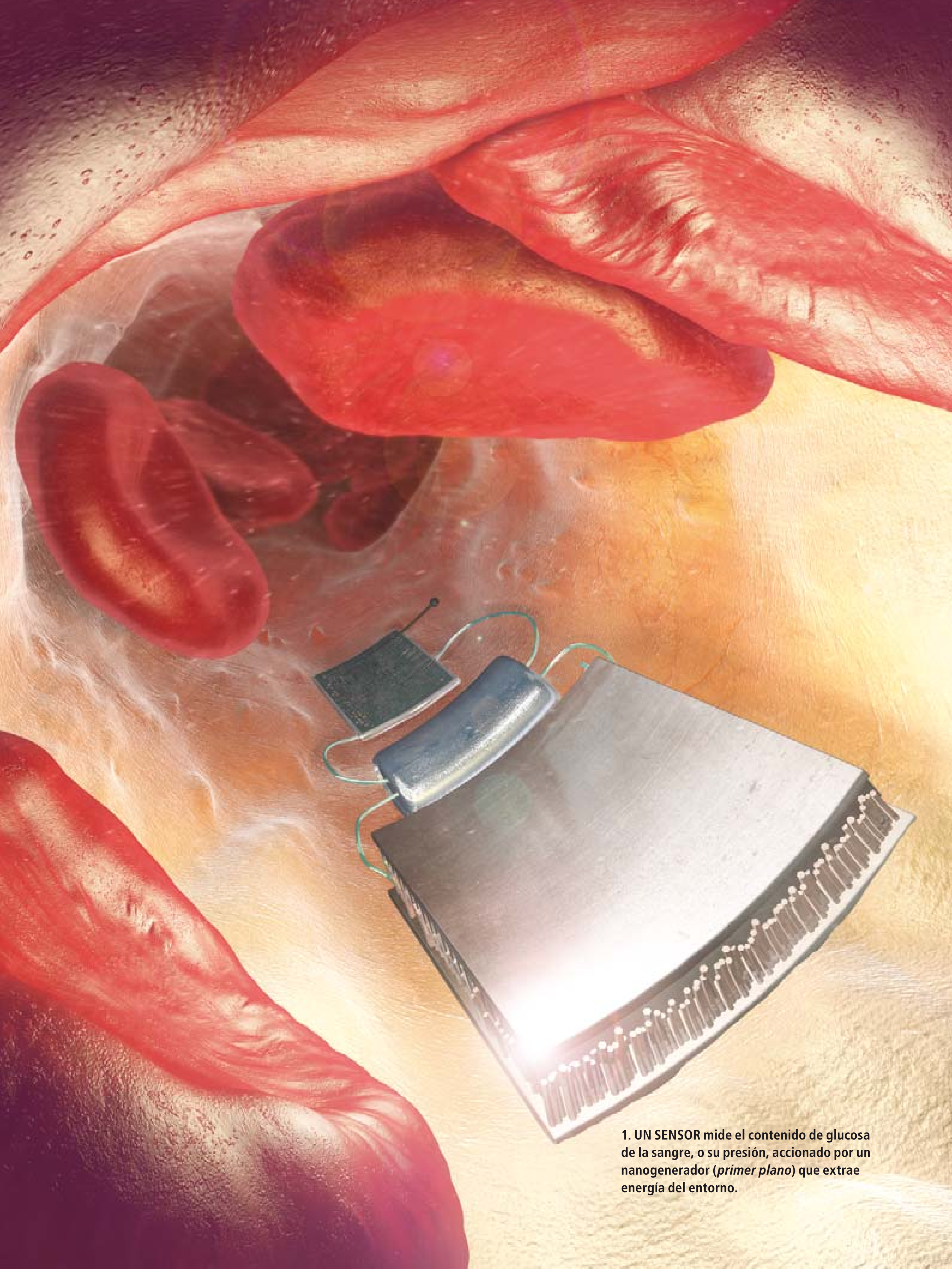
Una ventaja fundamental de los dispositivos y sistemas nanométricos es que funcionan con unos niveles de potencia muy bajos, de los nanowatt a los microwatt, lo que sitúa dentro del reino de lo posible a los nanogeneradores necesarios para accionarlos. Piénsese sólo en las fuentes energéticas potenciales que brinda el cuerpo humano: energía mecánica, energía térmica, energía vibratoria, energía química (en forma de glucosa) y energía hidráulica (del aparato circulatorio). Convertida en electricidad, una pequeña fracción de esa energía bastaría para alimentar numerosos tipos de pequeños dispositivos.

Energía limitada

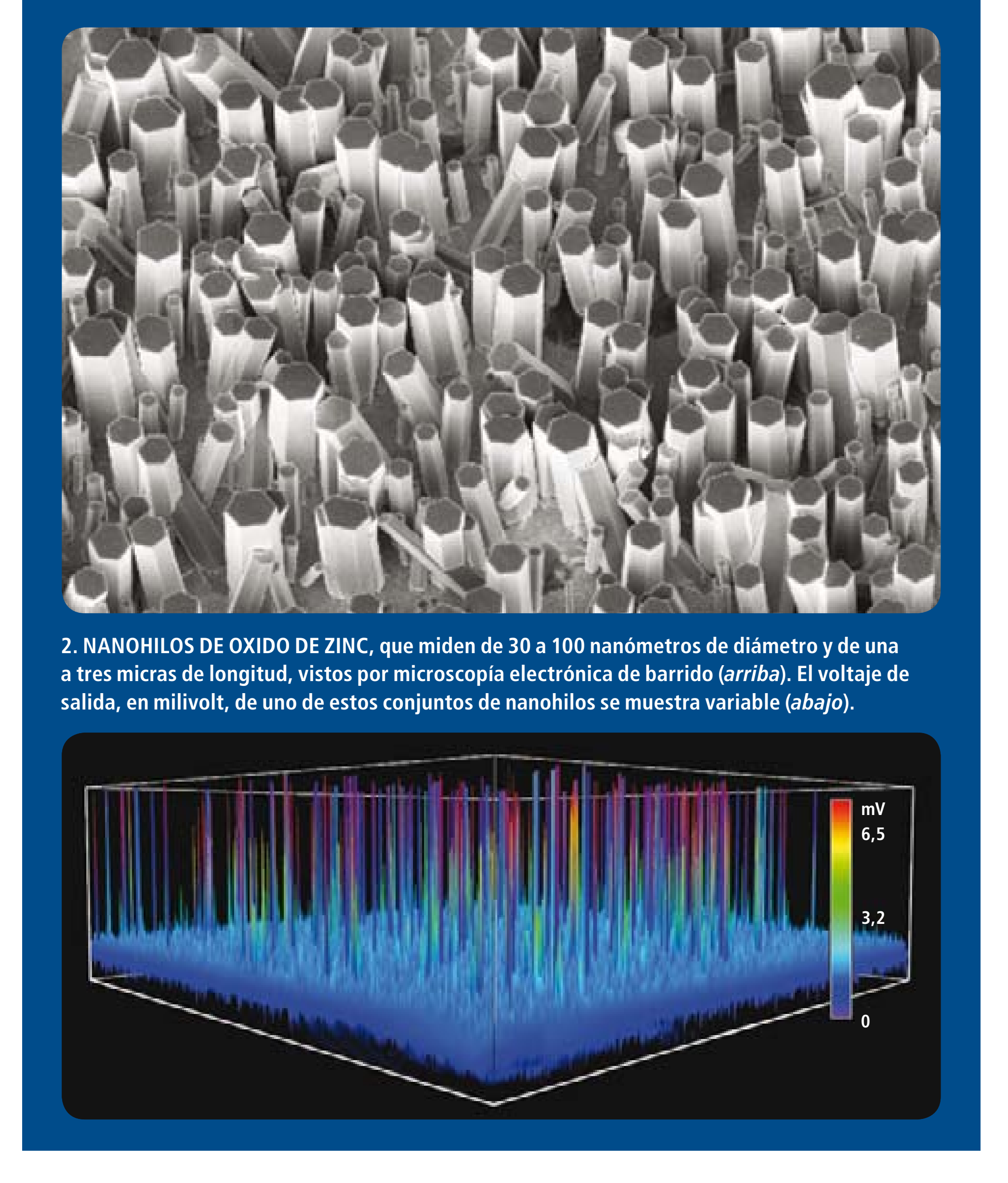
El trabajo sobre la generación de energía para dispositivos pequeños ha evolucionado rápidamente desde finales de los años noventa, cuando los investigadores del dominio de la electrónica portátil se interesaron en el problema de hallar nuevos modos de alimentarlos. Experimentadores del Laboratorio de Medios de Comunicación del Instituto de Tecnología de Massachusetts idearon un zapato recuperador de energía basado en el efecto piezoeléctrico, por el cual ciertos materiales cristalinos producen una tensión eléctrica si se los somete a esfuerzos mecánicos.

Pero la dificultad de producir energía en cantidades útiles no tardó en impulsar la investigación en generadores que pudieran cumplir con las mucho más reducidas necesidades de energía eléctrica de los SMEM. Estos dispositivos basados en el silicio, cuyas dimensiones caen entre las micras (milésimas de milímetro) y los milímetros, han encontrado muchas aplicaciones; entre ellas, los acelerómetros de los sistemas de petos de aire de los automóviles

ADAM QUESTELL



1. UN SENSOR mide el contenido de glucosa de la sangre, o su presión, accionado por un nanogenerador (*primer plano*) que extrae energía del entorno.



2. NANOHILOS DE OXIDO DE ZINC, que miden de 30 a 100 nanómetros de diámetro y de una a tres micras de longitud, vistos por microscopía electrónica de barrido (*arriba*). El voltaje de salida, en milivolt, de uno de estos conjuntos de nanohilos se muestra variable (*abajo*).

y las boquillas de las impresoras de chorro de tinta. La biología y la química también ofrecen oportunidades para generar energía.

En los últimos años, se han construido generadores basados en las vibraciones que hacen uso de transductores, tanto piezoeléctricos como electromagnéticos. El microgenerador electromagnético emplea un imán móvil o una bobina para inducir una corriente eléctrica en un circuito. Aunque se han manufacturado algunos microgeneradores a la escala de los SMEM, miden de uno a 75 centímetros cúbicos y funcionan en unos intervalos de vibraciones de 50 hertz (ciclos por segundo) a cinco kilohertz. Un generador piezoeléctrico vibrátil típico hace uso de un voladizo bicapa de titanato de plomo zirconio, con una masa apoyada en su extremo libre, algo así como un nadador a punto de saltar desde el extremo de un trampolín. Cuando la gravedad comba la viga hacia abajo, se estira la capa superior piezoeléctrica y se comprime la capa inferior. En razón de ello, aparece un voltaje negativo entre ambas caras. Cuando la masa oscila arriba y abajo, se crea una tensión eléctrica alterna. Con un generador de tamaño notable, la gravedad se convierte en un factor importante para el impulso de la masa oscilante.

Mi grupo de investigación del Instituto de Tecnología de Georgia está trabajando en la generación de energía piezoeléctrica a escala nanométrica. Y aquí, las cosas cambian. La gravedad, cuyo papel es crítico en un mundo más grande, en el mundo nanométrico es un factor muy secundario, comparada con las fuerzas de enlace químico y de atracción molecular.

Donde la gravedad no cuenta

En el mundo nanométrico, la gravedad no aporta especial ventaja. Si tratásemos de construir un generador piezoeléctrico con una viga en voladizo nanométrica, la gravedad apenas contribuiría al movimiento de ésta y el dispositivo no funcionaría. Por tanto, para alimentar dispositivos autónomos precisamos nanogeneradores construidos de otro modo. Nuestro equipo ha venido investigando nanotecnias innovadoras para transformar energía mecánica (la del movimiento corporal o la extensión muscular), energía vibratoria (la acústica o la

El autor

Zhong Lin Wang es director del centro de caracterización de nanoestructuras del Instituto de Tecnología de Georgia. En 2000 inventó el nanocinturón y en 1998, la balanza más pequeña del mundo, la nanobalanza. Entre otras muchas distinciones, recibió en 1999 la Medalla Burton de la Sociedad Americana de Microscopía.

CORTESIA DE ZHONG LIN WANG

ultrasónica) y energía hidráulica (la del torrente sanguíneo u otros flujos corporales) en una energía eléctrica, apta para dispositivos nanométricos.

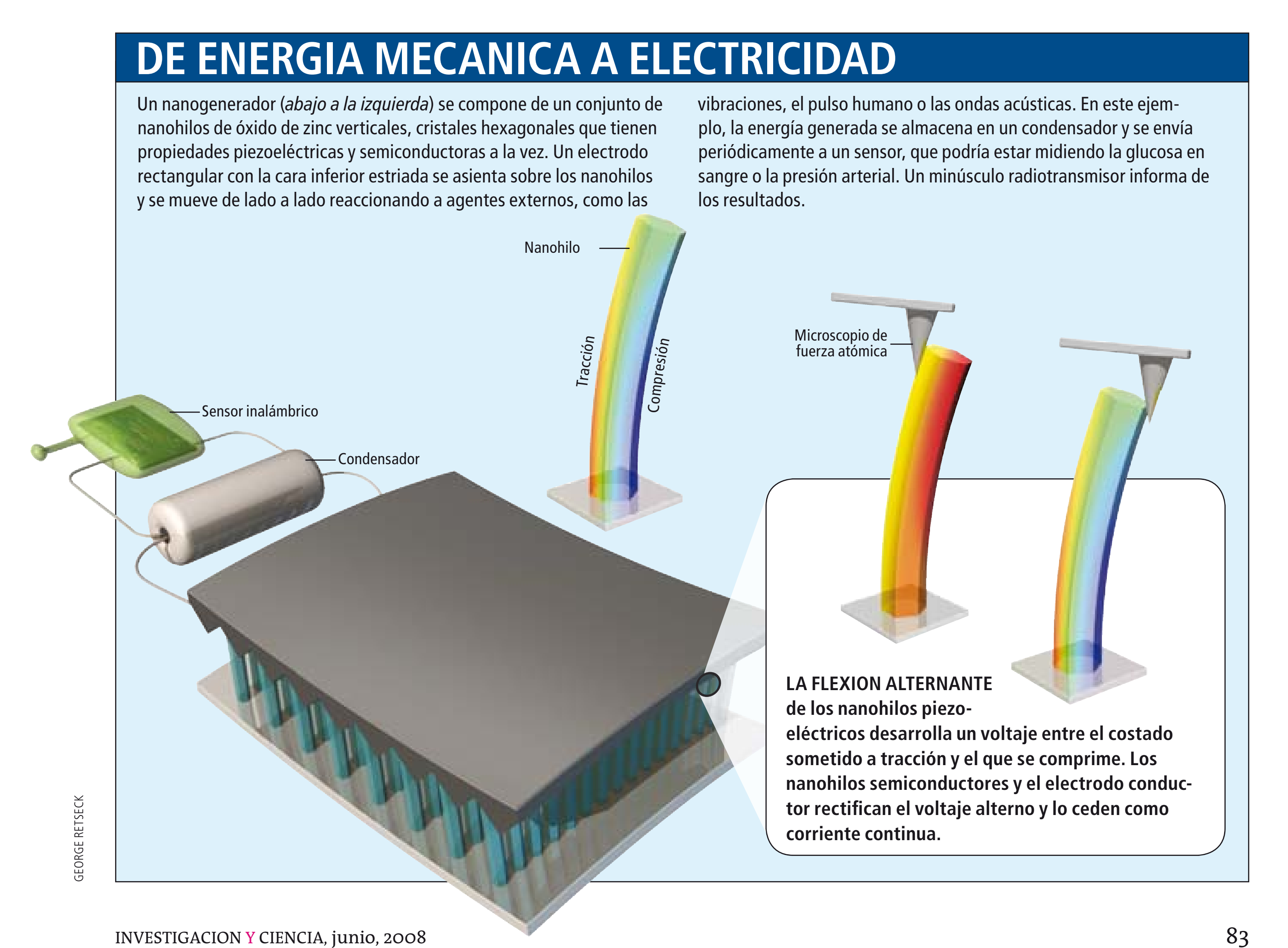
A finales de los años noventa, orienté mis investigaciones hacia los nanotubos de carbono. Inventamos así algunas técnicas para medir mediante microscopía *in situ* las propiedades mecánicas, eléctricas y de emisión de campo de nanotubos de carbono aislados. Pero no pudimos controlar las propiedades eléctricas de los nanotubos. Me di cuenta de inmediato de que los óxidos metálicos constituían un mundo nuevo: ¿por qué no explorar esas nanoestructuras? En 2000 empecé con nanocinturones, unos productos blancos de textura lanosa que se obtienen al cocer un óxido metálico, como el de zinc, en presencia de argón a una temperatura de 900 a 1200 grados Celsius, y con nanohilos.

Nuestra investigación ha acabado por centrarse en los nanohilos alineados de óxido de zinc, cada uno de ellos un cristal perfecto en forma de columna de seis lados que se hace crecer, sobre un sustrato sólido conductor, mediante un proceso ordinario líquido-sólido-vapor en un pequeño horno tubular. Para ello depositamos nanopartículas de oro, que sirven de catalizador, sobre un sustrato de zafiro. A la vez que se calienta polvo de óxido de zinc, un flujo de argón atraviesa el horno. Debajo de las partículas de oro crecen los nanohilos, cuyo diámetro típico oscila entre 30 y 100 nanómetros y su longitud varía entre una y tres micras.

La idea de convertir energía mecánica en electricidad se me ocurrió en agosto de 2005. Nos hallábamos por entonces midiendo las propiedades electromecánicas acopladas de los hilos. Con un microscopio de fuerza atómica (MFA), habíamos observado algunos picos en la tensión de salida, pero no estaba claro de qué se trataba. Pasamos todo noviembre de aquel año efectuando un trabajo sistemático. Averiguamos así que la tensión procedía del efecto piezoeléctrico del óxido de zinc; ello excluía la contribución de la fricción, los contactos o cualquier otra perturbación que nos indujese a error. El paso siguiente constituyó en determinar el proceso para la producción de carga en un solo nanohilo. Tras estudiar un libro sobre dispositivos semiconductores,

DE ENERGIA MECANICA A ELECTRICIDAD

Un nanogenerador (*abajo a la izquierda*) se compone de un conjunto de nanohilos de óxido de zinc verticales, cristales hexagonales que tienen propiedades piezoeléctricas y semiconductoras a la vez. Un electrodo rectangular con la cara inferior estriada se asienta sobre los nanohilos y se mueve de lado a lado reaccionando a agentes externos, como las vibraciones, el pulso humano o las ondas acústicas. En este ejemplo, la energía generada se almacena en un condensador y se envía periódicamente a un sensor, que podría estar midiendo la glucosa en sangre o la presión arterial. Un minúsculo radiotransmisor informa de los resultados.



LA FLEXION ALTERNANTE de los nanohilos piezoeléctricos desarrolla un voltaje entre el costado sometido a tracción y el que se comprime. Los nanohilos semiconductores y el electrodo conductor rectifican el voltaje alterno y lo ceden como corriente continua.

GEORGE RETSECK

propuse el mecanismo del que sería nuestro nanogenerador.

El óxido de zinc goza del raro atributo de poseer propiedades tanto piezoeléctricas como semiconductoras. De ambas hicimos uso para crear y acumular cargas piezoeléctricas en los nanohilos. Hemos demostrado que cuando la punta conductora de un MFA flexiona un nanohilo recto vertical, se establece un campo de esfuerzos mecánicos, donde la superficie bajo tracción sufre un esfuerzo positivo y la superficie comprimida un esfuerzo negativo. Cuando la punta del MFA barre los extremos superiores de los nanohilos de óxido de zinc, se observan numerosos picos en la correspondiente gráfica de las tensiones eléctricas de salida para cada posición de contacto. El efecto piezoeléctrico crea un campo eléctrico dentro del volumen del nanohilo, y los costados estirado y comprimido de éste muestran unas tensiones eléctricas positiva y negativa, respectivamente.

La idea llegó antes, pero necesitábamos el respaldo de la experimentación. Justo antes de la Navidad de 2005, diseñé un experimento para observar directamente el voltaje de salida de un hilo grande mediante microscopías óptica y de fuerza atómica. Con la colaboración de un alumno acometí los experimentos. Cierto atardecer de finales de diciembre nos vimos recompensados con varios vídeos que confirmaban directamente mi modelo. Al día siguiente trabajé con Jinhui Song en el despacho para editar el filme. Luego enviamos el trabajo a *Science* para su publicación.

Para ser aplicable en la práctica, nuestro nanogenerador necesita incorporar un conjunto ordenado de nanohilos, todos los cuales deben generar continuamente una electricidad que pueda recogerse y entregarse a un dispositivo. Y la energía que ha de convertirse en electricidad debe proceder del entorno, en forma de ondas o vibraciones, para que el nanogenerador pueda funcionar independientemente y sin cables. Hemos desarrollado un diseño de nuevo cuño que encara esos requisitos.

El reto siguiente era aumentar la potencia del nanogenerador. Hay que cubrir tres objetivos: prescindir del MFA, hacer que un gran número de nanohilos generen electricidad simultáneamente y excitar los nanohilos con una onda indirecta, que podría ser una onda ultrasónica. Se me ocurrió entonces un nuevo diseño, que empleaba un electrodo acanalado en lugar de las puntas del MFA, y le pasé la idea a Xudong Wang, mi ayudante posdoctoral. Estuvo experimentando unos cuatro meses antes de reunir el primer grupo de datos. La señal era bastante débil. De mayo a octubre de 2006 nos concentramos en la búsqueda del empacado del nanogenerador que optimizase la señal de salida. A finales de año nos percatamos de que, al fin, podíamos informar de nuestro nanogenerador a la comunidad científica.

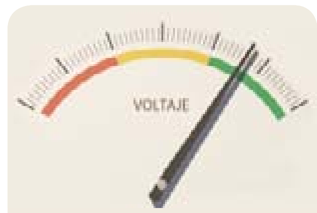
Nuestro dispositivo experimental ofreció la primera muestra de corriente continua ininterrumpida producida por un nanogenerador piezoeléctrico. Se compone de un conjunto ordenado de nanohilos de óxido de zinc paralelos y, en vez de la punta del microscopio, de un electrodo de silicio revestido de platino con la superficie estriada. El revestimiento de platino del electrodo aumenta su conductividad y hace que actúe como un diodo que permite el paso de corriente sólo en un sentido, del metal al semiconductor. El electrodo se encuentra a una distancia controlada por encima del conjunto de nanohilos y puede moverse lateralmente de modo que flexione los nanohilos de un lado a otro. Gracias a las superficies estriadas, el electrodo actúa como un conjunto alineado de puntas de microscopio.

Un futuro flexible

Desde enero de 2007 nos hemos dedicado a mejorar el nanogenerador. Por ejemplo, los sustratos cerámicos o semiconductores que inicialmente empleamos para formar los nanohilos de óxido de zinc son duros y frágiles, lo cual los volvía inadecuados para aplicaciones que requieran una fuente de alimentación plegable o flexible, como es el caso de los biosensores implantados en músculos o articulaciones, o los generadores de energía integrados en el calzado.

Aquí es donde los polímeros conductores podrían proporcionar un sustrato biocompatible. Descubrimos experimentalmente que la idoneidad de numerosos sustratos de plástico flexible del mercado para formar los conjuntos de nanohilos de óxido de zinc, que hallarían aplicación en la electrónica portátil y flexible. Dada la flexibilidad del sustrato, el perfil de la superficie del nanohilo era ondulada, con lo que se perdían algunos contactos. Creemos que lograr una optimización del espaciado de los nanohilos y una intensidad adhesiva adecuada entre los nanohilos y el sustrato contribuirá mucho a aumentar la eficiencia de la descarga.

Aunque nuestro método ha puesto de manifiesto la validez del nanogenerador, para que éste resulte práctico debemos mejorar su rendimiento. Los nanohilos han de producir electricidad todos a la vez e interrumpidamente: esa electricidad debe recogerse y distribuirse con eficiencia. Un procedimiento de formación de nanohilos de óxido de zinc a gran escala resultaría rentable porque no requiere un caro proceso de manufactura a alta temperatura. Tenemos aún que aprender a formar conjun-



¿Y cuánta energía produce el cuerpo?

Torrente sanguíneo
Potencia mecánica: 0,93 watt
Potencia eléctrica disponible: 0,16 watt
Energía eléctrica por cada movimiento: 0,16 joule

Espiración
Potencia mecánica: 1,00 watt
Potencia eléctrica disponible: 0,17 watt
Energía eléctrica por cada movimiento: 1,02 joule

Inhalación
Potencia mecánica: 0,83 watt
Potencia eléctrica disponible: 0,14 watt
Energía eléctrica por cada movimiento: 0,84 joule

Extremidades superiores
Potencia mecánica: 3,00 watt
Potencia eléctrica disponible: 0,51 watt
Energía eléctrica por movimiento: 2,25 joule

Caminar
Potencia mecánica: 67,00 watt
Potencia eléctrica disponible: 11,39 watt
Energía eléctrica por cada movimiento: 18,90 joule

Tecleado
Potencia mecánica: 6,9-19,0 miliwatt
Potencia eléctrica disponible: 1,2-3,2 miliwatt
Energía eléctrica por cada movimiento: 226-406 microjoule



TIM PLATT *Getty Images* (*pose de yoga*); PM IMAGES/GETTY IMAGES (*portátil*)

Captadores de la energía ambiental

Los nanogeneradores piezoeléctricos vibrátiles son prometedores, pero existen también otros procedimientos para extraer energía del entorno

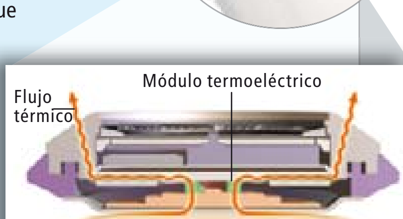
La captación de energía más eficiente se da en la naturaleza, en los microorganismos cuya supervivencia depende de ello. Derek R. Lovley, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y sus colaboradores informaron de un organismo marino, *Desulfuromonas acetoxidans*, que transfiere electrones a un electrodo de grafito desde el acetato que otros organismos producen en los sedimentos marinos. El resultado es una corriente eléctrica que fluye a través del agua hacia otro electrodo. Tales "pilas sedimentarias" podrían emplearse para el biosaneamiento de residuos tóxicos. Análogamente, la acción catalítica de los microorganismos produce electricidad a partir de distintos carbohidratos y sustratos.

En 2004 un grupo de investigadores dirigidos por A. K. Shukla, del Instituto Central de Investigaciones Electroquímicas de la India, hizo una demostración de pilas de combustible biológicas que generan una corriente eléctrica mediante sustancias orgánicas y procesos metabólicos. Podemos aprovechar los recursos de nuestro propio cuerpo, incluido el metabolismo celular, para generar energía suficiente que abastezcan dispositivos médicos muy dispares, entre ellos sistemas de administración de fármacos, marcapasos e instrumentos de diagnóstico. El inconveniente de las pilas de combustible microbiano es su tamaño, excesivo, y una potencia útil que pudiera ser insuficiente para aplicaciones no biológicas.



1. LA PILA sedimentaría saca su energía de organismos marinos.

Otra posibilidad es el generador termoeléctrico basado en el efecto Seebeck, en cuya virtud se crea una diferencia de potencial eléctrico en el empalme entre dos metales disímiles que se encuentran a temperatura diferente. El voltaje generado es proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos extremos; en este efecto se basan los termopares que miden temperaturas. Cuando se aplica una diferencia de temperatura, en el material se difunden portadores de carga desde el lado caliente hacia el lado frío. Los portadores de carga móviles que migran hacia el lado frío dejan tras sí, en el caliente, sus respectivos e inmóviles núcleos con una carga de signo contrario, lo que origina un voltaje termoeléctrico.



2. EL GENERADOR TERMOELECTRICO aprovecha las diferencias de temperatura.

La termoelectricidad es un terreno apasionante. No obstante, los generadores termoeléctricos han de alcanzar un tamaño considerable para mantener una diferencia de temperaturas apreciable entre los dos extremos del dispositivo. Por consiguiente, sus posibilidades como fuentes de alimentación integrables en nanosistemas resultan limitadas. Han hallado aplicaciones comerciales, sin embargo, como el reloj de pulsera Thermic de Seiko, presentado en 1998, que empleaba módulos termoeléctricos para generar una cantidad de microwatt, suficiente para el funcionamiento de sus mecanismos gracias al pequeño gradiente entre el calor corporal del usuario y la temperatura ambiente.

tos de nanohilos uniformes, en los que todos produzcan electricidad, y a alargar su vida útil. La vida de los nanogeneradores actuales es de unas 50 horas.

La causa principal del fallo del dispositivo reside a buen seguro en la técnica de empacado que se emplea en el ensamblado del electrodo superior y los conjuntos de nanohilos: si el electrodo presiona con demasiada firmeza los nanohilos, por ejemplo, no se producirá corriente. Estamos trabajando para mejorar el empacado.

En el proceso de producción de los conjuntos de nanohilos interviene la evaporación de una capa fina de oro sobre el sustrato, donde actúa como catalizador del crecimiento de los nanohilos. Los cristales de óxido de zinc recuerdan a un bosque sin ramas. Para mejorar la adhesión de los nanohilos al sustrato, a éste, tras el crecimiento, le hemos superpuesto una capa fina de polímero, de modo que las raíces de los nanohilos quedan parcialmente incrustadas en ella. De un generador de unos seis milímetros cuadrados de tamaño, hemos obtenido unas salidas de alrededor de 10 milivolt y 800 nanoampere. Hemos demostrado también que los nanogeneradores pueden disponerse en serie, para aumentar el voltaje de salida, y en paralelo, para mejorar la corriente producida, como se hace con las baterías electrolíticas o las pilas de combustible. Para producir unos voltajes mayores, se requiere, no obstante, fabricar nanohilos de altura y diámetro iguales.

Los nanogeneradores no servirán para alimentar nuestros hogares, ni siquiera nuestras linternas de bolsillo, pues darán unas corrientes muy reducidas. Pero los conjuntos de nanohilos quizá sean los generadores ideales para dispositivos que deban trabajar de forma intermitente, como los sensores que reciben y transmiten información durante un segundo de cada minuto. En los años próximos se emplearán nanogeneradores para recuperar y reciclar la energía que desperdiciamos en nuestra vida cotidiana, la que se crea en los cambios de presión de los neumáticos, en las vibraciones mecánicas de los vehículos, incluso en la superficie de una tienda de campaña agitada por el viento. Nos rodean muchas pequeñas fuentes de energía.

GEORGE RETSECK

Bibliografía complementaria

DIRECT-CURRENT NANOGENERATOR DRIVEN BY ULTRASONIC WAVES. X. D. Wang, J. H. Song, J. Liu y Z. L. Wang en *Science*, vol. 316, págs. 102-105; 2007.

NANOWIRE PIEZOELECTRIC NANOGENERATORS ON PLASTIC SUBSTRATES AS FLEXIBLE POWER SOURCES FOR NANODEVICES. Pu Xian Gao, Jinjui Song y Zhong Lin Wang en *Advanced Materials*, vol. 19, págs. 67-72; 2007.

La máquina de Draper

Una sencilla máquina para obtener, por abrasión, componentes ópticos y mecánicos

Marc Boada Ferrer

Para la obtención de pantallas de retroproyección, muestras metalográficas o láminas delgadas destinadas a la observación microscópica utilizamos métodos de abrasión manuales. Si lo que queremos fabricar son reflectores, lentes y otros componentes que exigen un perfecto acabado superficial, deberemos mecanizar el proceso.

Al experimentador interesado en obtener, por abrasión, todo tipo de componentes, le conviene construir una versión simplificada de la máquina que Henry Draper construyó en el siglo XIX. Mediante ese ingenio famoso en el dominio de la óptica, se acelera y automatiza la producción.

La abrasión nos permite modificar la morfología y la calidad superficial de materiales de gran dureza. Se basa en la aplicación de un abrasivo granular, duro y tenaz como el diamante o el esmeril. Mezclado con agua, el abrasivo se interpone entre el material que queremos desgastar y una herramienta que facilita el control del proceso.

La máquina de Draper es, en esencia, un disco rotatorio horizontal. Guarda semejanza con el torno de alfarero. Fijaremos en el disco la herramienta o la pieza, según sea el caso; mediante una palanca orientable que presionará una contra otra, desbastaremos, alisaremos o puliremos la muestra. Obtendremos así facetados, contorneados y superficies cóncavas y convexas.

Para empezar, construiremos una mesa sólida y pesada. Utilizaremos paneles de madera aglomerada de 20 o 30 milímetros de espesor, que uniremos con cola para madera y largos tirafondos. Mediante unas capas de pintura para piscinas, la protegeremos del agua y la suciedad, inherentes a todo proceso de abrasión. No estará de más añadir un anaquel en la base, donde incorporaremos un lastre, y otro en el lateral, para almacenar abrasivos, pinceles y cucharillas dosificadoras.

Situaremos luego un barreño de material resistente, de unos 400 milímetros de diámetro, en la esquina frontal izquierda de la mesa. Su centro determinará el punto de fijación de un taladro de mano, que operará a modo de fuerza motriz. Elegiremos un taladro capaz de girar lentamente en ambos sentidos, es decir, con cambio mecánico de revoluciones y regulador electrónico de velocidad. La unión de éste en la parte interior de la mesa se efectúa mediante un accesorio de fijación que encontraremos en ferreterías. Abriremos un agujero central en el fondo del barreño por donde asomará el portabrocas; fijaremos luego el recipiente a la superficie de la mesa, centrado siempre en el eje de giro del taladro.

Para protegernos de las salpicaduras, crearemos una suerte de laberinto. Además, el giro de los objetos implicados nos exige que la fijación del portabrocas al motor sea fácil y rápida. Nos convendrá un sistema versátil de fijación: acoplar un eje con una perforación roscada en el centro. El diámetro máximo que acepta el portabrocas suele ser de 13 milímetros; nos procuraremos, por tanto, un eje de ese diámetro, o inferior, con un taladro central roscado a M8.

Una vez fijado el eje al portabrocas y atornillado el taladro en el interior de la mesa, pegaremos al barreño un tubo, para evitar que el agua escape por el agujero central en dirección al taladro. Para cerrar el paso a la suciedad, utilizaremos otro tubo, más estrecho, con un taladro de 8 milímetros en la base (un tapón de pintura de *spray*, por ejemplo). Ese agujero permite poner el tapón sobre el eje, colocar encima una arandela metálica, también con taladro central de 8 milímetros, y sobre ésta otra de madera, metal o plástico, que constituirá la base de la herramienta.

Remataremos la primera fase de construcción con la abertura, en el barreño, de un agujero de vaciado, que prolongaremos con un tubo hasta un depósito inferior de recogida de residuos.

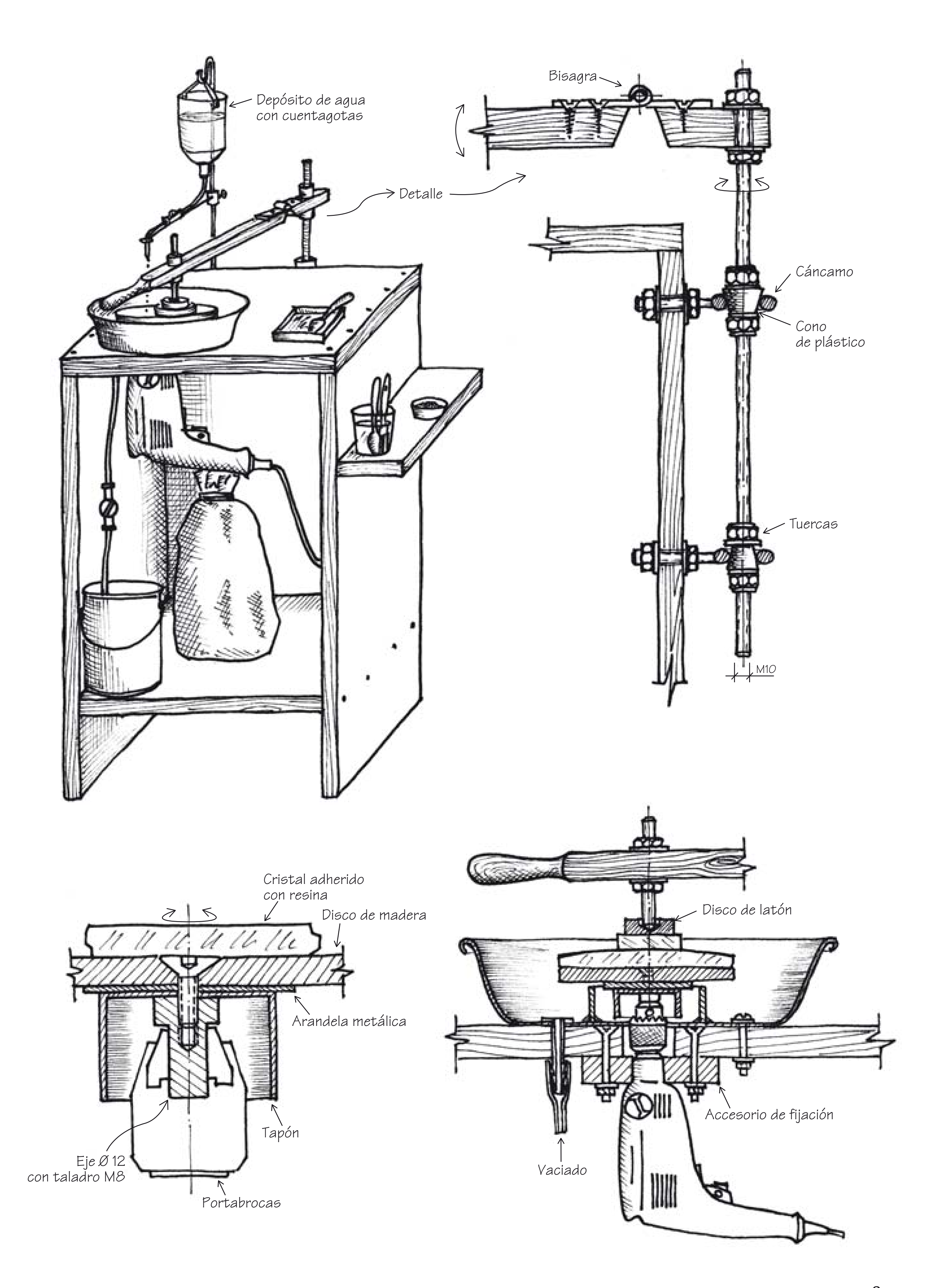
Aunque no está acabada la máquina, este esbozo preliminar ofrece numerosas aplicaciones. Pensemos, por ejemplo, en el afilado de una cuchilla, sea para un microtomo o para el fulcro de una balanza. En el segundo caso, montaremos sobre el portabrocas un disco de madera de 160 milímetros de diámetro; allí esconderemos la cabeza de un tornillo avellanado de M8, que se roscará en el eje del taladro. Verificaremos que al girar lo haga sobre un plano; si no lo hace, ejerceremos una suave presión sobre el punto más prominente hasta conseguir un buen alineado.

Con una espátula dentada, extenderemos sobre el disco de madera una capa de lacre, resina o brea, calentada al baño María. Fijaremos al disco de madera un disco de cristal de iguales dimensiones, que habremos calentado por inmersión en agua caliente y secado con una toalla.

Una vez frío, haremos girar el taladro despacio. Sobre el disco de cristal, extenderemos, con un pincel, una papilla de abrasivo del grano 600, agua y algunas gotas de jabón líquido. Procederemos entonces al afilado de las cuchillas. Para obtener una arista muy viva y afilada, deberemos reducir al mínimo las rugosidades superficiales; el tamaño de los granos del abrasivo deben ser minúsculo.

Para regular la geometría, empezaremos con el grano 600. Aplicaremos luego números mayores, hasta el máximo posible. El trabajo con cada grano debe ser exhaustivo; evitaremos así encontrar, tras muchas horas de trabajo, grandes defectos, que nos obligarían a volver a empezar. Si en alguna actividad resulta crítica esa exhaustividad es en la fabricación de instrumentos ópticos. En la obtención de superficies de precisión astronómica, cada cambio de granulometría implica una limpieza general de la máquina y adminículos; cualquier contaminación por un grano de mayor tamaño podría producir una profunda raya en el momento más inesperado.

En general, para la obtención de lentes y espejos con superficies esféricas, usaremos una herramienta del mismo tamaño que el disco de cristal donde los tallaremos. Para producir superficies


Depósito de agua
con cuentagotas
Detalle
Bisagra
Cáncamo
Cono
de plástico
Tuercas
M10
Cristal adherido
con resina
Disco de madera
Arandela metálica
Tapón
Eje Ø 12
con taladro M8
Portabrocas
Disco de latón
Accesorio de fijación
Vaciado

LA CAPA DE BEILBY

Desde William Herschel hasta John William Strut (Lord Rayleigh) han sido muchos los científicos que han estudiado la naturaleza del pulido. Pero es a Sir George Thomas Beilby (1850-1924) a quien debemos una interesante teoría de lo que acontece en las superficies durante el pulimento.

La superficie de un sólido entraña mayor complejidad de lo que parece a simple vista. Una visión microscópica de una superficie pulida nos mostraría una capa exterior de gases y vapor de agua adsorbidos; bajo ésta, un estrato oxidado; luego, la capa de Beilby producida por el bruñido; y, por fin, la capa más profunda, de material alterado por la mecanización de la pieza.

La capa postrera, en contacto con el núcleo inalterado, se caracteriza por la deformación de la estructura molecular; suele estar endurecida por el trabajo, al menos en los metales. La capa de Beilby, en cambio, parece el resultado de una fluidificación del material, que se ha desplazado sobre la superficie de mecanización rellenando defectos e irregularidades.

La fluencia de esa película superficial, de algunos átomos de espesor, es fruto del calor generado por la fricción durante el pulido o, más exactamente, por la presión puntual que ejercen los granos de pulimento en las zonas más elevadas del sustrato que abrillantamos.

Varios fenómenos apoyan la teoría de Beilby sobre el pulimento. Tras un bruñido intenso, por ejemplo, el retirado químico de la capa pulida evidencia la presencia de cráteres que habían desaparecido.

La textura de una superficie bien pulida guarda mayor semejanza con un líquido que con un sólido. Hablemos de un sustrato cristalino o vítreo, la capa de Beilby es siempre amorfa, como en un fluido. Tras decenios de estudio de esos fenómenos, no se comprenden todavía con profundidad. Ni siquiera la difracción de electrones ha demostrado la existencia de la capa de Beilby, al menos en materiales pulimentables: metales, vidrios y cristales.



1 Capa exterior de gases adsorbidos y vapor de agua (e = 1 nm)

2 Capa oxidada (e = 10-100 nm)

3 Capa de Beilby (e = 1-100 nm)

4 Capa afectada por el mecanizado (e = 10-100 μm)

5 Substrato inalterado

cóncavas, la herramienta deberá hallarse debajo. Para las superficies convexas, arriba. Sujetaremos la pieza de arriba mediante un brazo articulado.

El brazo, o palanca, consta de una articulación con dos grados de libertad. Se trata de un eje de varilla roscada y ajustado, mediante piezas cónicas, a dos cáncamos situados tras la máquina. El giro sobre un plano horizontal se complementa con una bisagra de unión en el extremo del brazo, que permite regular la inclinación. La varilla que presiona la pieza se remata con un casquete esférico; entre éste y la pieza, fijado también con brea, se interpone un disco de latón con una pequeña concavidad central.

En este punto, la máquina ya está lista para obtener todas las superficies esféricas necesarias para la construcción, por ejemplo, de un telescopio Cassegrain. Se procederá como sigue: desbaste o rebaje de las superficies con esmeril del n.º 60 hasta obtener los radios de curvatura adecuados (que verificaremos con un esferómetro), alisado con números entre 80 y 1200, y pulido con rojo inglés u óxido de cerio sobre una torta de brea formada por teselas cuadradas.

El abrillantado final implica un cambio radical de concepto respecto del desbaste y el alisado. En esas operaciones, el abrasivo arranca material de la superficie del cristal, desmenuzándose hasta formar una papilla con el agua y los restos de vidrio. Mientras desplazamos el cristal sobre la herramienta en rotación y en pleno desgaste, percibimos un ruido acompañado de cierta vibración. Si frotáramos un trozo de metal, en círculos, con un papel de lija grueso, se oiría un suave ronroneo. En el pulido, en cambio, el tamaño del grano y la perfecta adaptación superficial de la torta de brea al cristal hace que dominen los fenómenos de adherencia superficial. El cristal se resiste a ser desplazado sobre el pulidor de brea. En caso de secarse el abrasivo, por falta de agua, las superficies rechinan con una suerte de chillido.

En esas condiciones, el abrillantado avanza con prontitud. Tras un mínimo de 15 o 20 minutos de duro trabajo, empiezan a desaparecer los cráteres producidos por el esmeril del 1200. No hay extracción de material. Bajo la presión de los granos de abrasivo, el cristal fluye como la mantequilla, rellenando los defectos de la superficie.

En la jerga de los lapidarios, cuando una superficie es bruñida durante el tiempo suficiente, se “aviva el oriente”. En ocasiones, aparece de forma súbita una excelente reflexión superficial. La superficie pierde todo “gris” (cráteres residuales del alisado): deja de dispersar la luz para convertirse en un reflector especular. Si la iluminamos con una lámpara, observaremos la imagen de ésta con nitidez, como si de un espejo se tratara. Ello marca el fin del pulido. Ha llegado el momento de verificar la planitud y corregir, si es necesario, los defectos de la superficie.

De acuerdo con la geometría de la superficie así será el aparato de medida empleado. Si plana, se compara con un patrón de referencia, de calidad contrastada. Los elementos cóncavos (espejos para telescopio, por ejemplo) se verifican mediante el aparato de Foucault. Se sitúa una fuente de luz puntual en el centro de curvatura del espejo; se analiza la imagen reflejada a partir de las zonas iluminadas y oscuras que genera una cuchilla al cortar los rayos paraxiales. Mediante la interpretación del patrón de interferencias y la medición de la posición de la cuchilla se determina la geometría del reflector (esférico o parabólico) y sus principales defectos; todo ello con precisiones superiores a un vigésimo de la longitud de onda de la luz empleada.

Claves para proteger el clima

Para evitar un calentamiento global catastrófico hay que comprometerse de forma radical e inmediata con la promoción de nuevas técnicas

Jeffrey D. Sachs

La política tecnológica es fundamental en el desafío que supone el cambio climático. Incluso desperdiciando menos energía, con las técnicas actuales no es posible mantener a la vez una reducción de las emisiones de dióxido de carbono y un crecimiento económico mundial. Si intentamos contener las emisiones sin contar con un equipamiento técnico fundamentalmente nuevo, acabaremos estancando el crecimiento económico y limitando el desarrollo de millones de personas.

A menudo, los economistas se expresan como si para reducir las emisiones de dióxido de carbono en la medida necesaria bastase con ponerles un precio, sea mediante permisos negociables o impuestos sobre el carbono. No es así. El sistema de permisos negociables europeo del carbono no ha demostrado mucha capacidad para generar investigación a gran escala, ni para crear, ensayar y utilizar técnicas avanzadas. Un sistema de permisos negociables podría influir a la hora de elegir entre centrales de carbón y de gas o de implantar más energía solar y eólica, pero no conducirá a la necesaria y fundamental revisión de los sistemas energéticos.



Por ello es necesario mucho más que poner un precio al carbono. Consideremos tres potenciales técnicas de baja emisión: la captación y almacenamiento de carbono (CAC), los automóviles híbridos enchufables y la generación de electricidad termosolar concentrada. Cada una requerirá una combinación de factores para su funcionamiento: más investigación científica aplicada, cambios en la legislación, infraestructura apropiada, aceptación pública y grandes y rápidas inversiones. El fracaso de cualquiera de estos factores podría acabar con esas técnicas.

La CAC, por ejemplo, depende de la capacidad de captar dióxido de carbono a bajo coste en las centrales de energía, transportarlo por tuberías a larga distancia y almacenarlo bajo tierra de forma segura, fiable y duradera. No falta mucho para poder utilizar todos estos componentes, pero cada uno tropieza con dificultades importantes. La captación de carbono es más prometedora para nuevos tipos de centrales de combustión de carbón cuyo coste y fiabilidad están todavía por probarse. Una nueva y extensa red de tuberías para el dióxido de carbono requeriría un gran apoyo de políticas y normativas, con obstáculos ambientales y trabas por los derechos de propiedad. El almacenamiento geológico de dióxido de carbono a gran escala también debe ensayarse, vigilarse cuidadosamente y someterse a regulaciones ambientales. Es probable que los primeros proyectos experimentales sean mucho más costosos que los posteriores. Para la adopción de esta técnica será crucial una amplia aceptación y apoyo públicos. El gobierno de Estados Unidos todavía no ha puesto en marcha ni siquiera la demostración experimental de una central de energía CAC; asimismo, varias iniciativas privadas están actualmente aparcadas, por la falta de apoyo y financiación públicas.

Los automóviles híbridos enchufables plantean interrogantes similares. Quedan por resolver cuestiones básicas relativas a la seguridad, fiabilidad y duración de las baterías, y han de efectuarse inversiones extra en la red eléctrica general para mantenerlos. La energía termosolar, que utiliza radiación solar concentrada de las zonas desérticas para hervir el agua y generar con el vapor electricidad en una turbina, depende también de que se resuelvan numerosas dificultades. Entre los problemas científicos se incluye el almacenamiento nocturno de energía; entre los obstáculos normativos y financieros, la instalación de una nueva red de transmisión de corriente continua a alto voltaje para el transporte de energía a largas distancias desde el desierto.

Y para hacer las cosas más difíciles, los países más pobres deberán adoptar rápidamente las técnicas de baja emisión desarrolladas en el mundo rico. Las patentes, si bien promueven la innovación, podrían frenar la difusión de estas técnicas, a menos que se tomen medidas compensatorias, en los países de rentas bajas.

Todas estas innovaciones deberán estar listas muy pronto si queremos tener la oportunidad de estabilizar las emisiones de carbono a niveles que eviten grandes costes mundiales, potencialmente devastadores. Para 2010 como muy tarde, el mundo debería empezar a ensayar la CAC en centrales de quema de carbón en China, India, Europa y los EE.UU.; las naciones ricas deberían ayudar en la financiación y construcción de centrales de energía termosolar concentrada en los estados fronterizos con el Sahara; y, con la ayuda de grandes subvenciones, los híbridos enchufables deberían estar saliendo de las cadenas de montaje. Sólo estos pasos nos permitirán vislumbrar el camino hacia un cambio verdaderamente transformador.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

El problema de los tres dioses

Un dios dice siempre la verdad, el otro siempre miente y un tercero responde aleatoriamente. Averiguar su identidad es "el problema lógico más difícil de la historia"

Juan M. R. Parrondo

En 1996, George Boolos, profesor de lógica del MIT, publicó en *The Harvard Review of Philosophy* el problema de los tres dioses, una variante de los famosos acertijos de escuderos mentirosos y caballeros sinceros que pueblan los excelentes libros de Raymond Smullyan. Boolos lo presentó, con algo de exageración, como "el problema lógico más difícil de la historia". Veremos primero una variante del mismo y, más tarde, la versión original.

Tenemos ante nosotros tres dioses. Sabemos que uno de ellos es el dios de la Verdad, quien, obviamente, siempre dice la verdad. Otro de ellos es el dios de la Mentira, que siempre miente. Y el tercero es el dios de la Confusión, que responde al azar a cualquier pregunta que se le formule.

El problema consiste precisamente en averiguar quién es quién formulando sólo tres preguntas cuya respuesta sea necesariamente sí o no. No valen preguntas del tipo "¿qué respondería tu compañero de la izquierda si le preguntara si es cierto que dos más dos son cuatro?", ya que si el dios interrogado es el de la Verdad o el de la Mentira y el compañero de la izquierda fuera el de la Confusión, entonces el interrogado tendría que responder "no sé" o morderse la lengua. Basta con que exista la posibilidad de contestar algo distinto a "sí" o "no" para que la pregunta no sea válida.

Vamos a acotar aún más las preguntas: sólo se puede preguntar por el nombre de los dioses o combinaciones lógicas de los mismos. Se pueden formular las tres preguntas al mismo dios o a dioses diferentes y una pregunta puede depender de las respuestas obtenidas anteriormente. Pero sólo disponemos de tres preguntas y, tras ellas, deberemos saber con certeza el nombre de cada uno de los dioses. A continuación doy una de las posibles soluciones y más tarde discutiremos el problema original, que es aún más difícil que éste.

La teoría de la información nos dice que las preguntas óptimas son aquellas en las que las posibles respuestas tienen la misma probabilidad. En nuestro caso, tenemos que hacer preguntas cuya respuesta sea "sí" con probabilidad 1/2 y "no" con la misma probabilidad. De este modo, la pregunta nos aporta un bit de información. Sin embargo, en nuestro problema este criterio no basta (por algo es el problema "más difícil de la historia"), aunque ayuda bastante. No basta por culpa del endiablado dios de la Confusión, cuyas respuestas obviamente no aportan información alguna.

Llamemos A, B y C a los tres dioses que están ante nosotros. Hay seis combinaciones posibles de "personalidades", todas ellas igual de probables: VMC, VCM, MCV, MVC, CMV, CVM. Supongamos que formulamos a A una pregunta óptima, en el sentido de la teoría de la información. Esta pregunta no podrá eliminar en ningún caso las dos últimas posibilidades, CMV, CVM, en las que A es el dios de la Confusión y puede, por tanto, responder cualquier cosa. Si la pregunta es óptima, eliminará sólo dos opciones (la mitad de las cuatro primeras) y nos quedaremos con cuatro posibilidades.

Estas cuatro posibilidades suponen una incertidumbre de dos bits y nos quedan dos preguntas más. Por tanto, las dos últimas preguntas han de ser también óptimas, pero esta vez de verdad. La segunda tiene que eliminar dos posibilidades de las cuatro restantes y, la última, conducirnos a la única instancia posible. Pero hemos visto que el dios de la Confusión no nos proporciona información alguna. Por lo tanto, es condición necesaria para resolver el problema que, tras la primera pregunta, sepamos con certeza que alguno de los dioses no es el de la Confusión.

Esta es la clave: la primera pregunta debe conducirnos a la conclusión de que alguno de los dioses no es el de la Confusión. ¿Cómo podemos conseguirlo? Vimos que, al preguntar a A, las posibilidades CMV y CVM son compatibles con cualquier respuesta y que, si hacemos la pregunta óptima, la respuesta sólo podrá eliminar dos de las posibilidades restantes: MVC, MCV, VMC, VCM. Si queremos, tras la primera pregunta, saber con certeza que alguno de los dos dioses no es el de la Confusión, necesariamente esta pregunta debe eliminar el par VMC, MVC (con lo que sabríamos que C no es el dios de la Confusión) o el par VCM, MCV (con lo que sabríamos que B no es el dios de la Confusión). Una vez determinada la información que nos tiene que proporcionar la pregunta, no es difícil formularla: "dios A, ¿es cierta al menos alguna de estas dos afirmaciones: a) B es el dios de la Mentira y C el dios de la Confusión o b) B es el dios de la Confusión y C el de la Verdad?"

Si A es el dios de la Verdad, sólo la afirmación a) puede ser cierta, y la respuesta será "sí" sólo si la instancia VMC es la verdadera y "no" si la disposición de los dioses es VCM. Si A es el dios de la Mentira, dirá "sí" sólo si las dos afirmaciones son falsas, es decir, sólo si la disposición de los dioses es MVC, y dirá "no" si la disposición es MCV. Por lo tanto, la respuesta "sí" nos deja como instancias posibles VMC y MVC (junto con las inevitables CMV, CVM), mientras que la respuesta "no" es compatible sólo con VCM y MCV, junto con CMV y CVM. Si la respuesta es "sí", sabemos con certeza que B no es el dios de la Confusión. Si



la respuesta es “no”, es C quien con toda seguridad no es el dios de la Confusión.

Las dos preguntas restantes son muy sencillas. Si la respuesta a la primera ha sido “sí”, preguntamos a B: “¿eres el dios de la Confusión?” Si dice que sí, entonces B tiene que ser el dios de la Mentira, y si dice que no, será el dios de la Verdad. Finalmente, le preguntamos a C por la personalidad de alguno de sus compañeros y con ello resolvemos completamente el problema. La dificultad estaba, sin duda, en la primera pregunta. Debido al “ruido” que produce el dios de la Confusión, la primera pregunta no aporta un bit de información. Si fuera así, permitiría eliminar la mitad de las instancias, es decir, tres de las seis posibilidades iniciales. Sólo elimina dos de ellas, como hemos visto, pero, correctamente formulada, permite que las dos preguntas siguientes sí aporten un bit cada una, reduciendo las cuatro posibilidades que quedan a una sola.

El “problema lógico más difícil de la historia” es, en realidad, un poco más difícil. En la formulación original de Boolos, los dioses responden en una lengua que nosotros desconocemos. Las palabras para “sí” y “no” son “da” y “ja”, pero no sabemos cuál es la afirmativa y la negativa. Sin entender siquiera lo que nos responden los dioses, ¡este problema sí parece el más difícil de la historia! Sin embargo, en el problema se elimina la restricción que antes impuse a las preguntas. Ahora no tienen por qué ser únicamente preguntas directas acerca de la personalidad de los dioses.

Hay una forma de obtener información incluso sin saber el significado de las respuestas. Si queremos saber la respuesta a cualquier pregunta q, basta preguntar: ¿Responderías “ja” a la pregunta q? Supongamos que q es cierta. Si el dios dice la verdad y “ja” es “sí”, la respuesta será “ja”. Pero si “ja” es “no”, el dios de la Verdad también responderá “ja”, diciéndonos “no responderé ‘no’ a la pregunta q”. Es decir, el dios de la Verdad responde “ja” si q es cierta y “da” si q es falsa, independientemente de lo que signifique “ja”. Pero aún hay más. El dios de la Mentira también responde “ja” si q es cierta, independientemente de lo que signifique “ja”. En efecto, si “ja” es “sí”, el dios de la Mentira, que respondería “da” a q, respondería “sí” a nuestra pregunta, es decir, respondería “ja”. Y si “ja” es “no”, el dios de la Mentira, que respondería “ja” a q, respondería “no” a nuestra pregunta, es decir “ja”.

Por lo tanto, si el dios al que preguntamos no es el de la Confusión, conoceremos si q es verdad o no con una simple pregunta. Este truco nos permite resolver el problema con cierta facilidad. La primera pregunta al dios A sería: “¿Si te preguntara ‘es B el dios de la Confusión’, responderías ‘ja’?”. Si la respuesta es “ja”, entonces, o bien A es el dios de la Confusión (posibilidad que ninguna respuesta puede eliminar) o bien B es el dios de la Confusión. En cualquier caso, sabríamos que C *no es* el dios de la Confusión y le preguntaríamos sobre la personalidad de A y B. Por otro lado, si la respuesta a nuestra primera pregunta es “da”, entonces o bien A es el dios de la Confusión o bien B no es el dios de la Confusión. En cualquier caso, B no sería el dios de la Confusión (puesto que si lo es A, B no puede serlo), y podremos preguntar a B sobre la personalidad de los otros dos.

Como pueden comprobar, con las tres preguntas resolvemos el problema, identificando la personalidad de los tres dioses, sin necesidad de conocer el significado de “da” y “ja”. Ni siquiera sabemos su significado después de las tres preguntas. De hecho, si el problema consistiera en adivinar las personalidades de los tres dioses *y* el significado de “da” y “ja”, ¡no tendría solución! La razón es que en este caso hay 12 posibilidades iniciales, las 6 disposiciones de personalidades de los tres dioses combinadas con las dos posibilidades para los significados de “da” y “ja”. Cada pregunta, si es óptima, elimina la mitad de las posibilidades. Por tanto, con tres preguntas podríamos resolver sólo problemas con un máximo de 8 posibilidades iniciales.

Existen aún más sutilezas y variantes del problema. Por ejemplo, B. Rabern y L. Rabern han puesto de manifiesto que es necesario aclarar el comportamiento del dios de la Confusión: ¿responde al azar (es decir, lanza una moneda para decidir su respuesta) o adopta al azar la disposición a decir la verdad o la mentira (es decir, lanza una moneda para decidir si dice la verdad o si miente)? En el segundo caso, el problema es trivial puesto que, como hemos visto, la respuesta “ja” a la pregunta “¿Responderías ‘ja’ si te preguntara q?” nos dice que q es cierta independientemente de si el dios preguntado es el de la Verdad o el de la Mentira. Por lo tanto, si el dios de la Confusión simplemente actúa como el de la Verdad o como el de la Mentira en cada pregunta, también al responder “ja” nos asegura que q es cierta.

Los mismos autores exploran preguntas autorreferentes que algún dios no puede contestar. Por ejemplo: “¿vas a contestar ‘ja’ a esta pregunta que te estoy haciendo?”. Si “ja” significa “no” y le hacemos esta pregunta al dios de la Verdad, no podrá responder nada, puesto, que tanto si responde “ja” como “da”, estará mintiendo. Como los dioses son infalibles, Rabern y Rabern concluyen que la única salida del dios de la Verdad es que le explote la cabeza. Proponen nuevos problemas en los que se pueden utilizar preguntas que manden la cabeza del dios por los aires. Ahora caben tres posibles respuestas: “ja”, “da” y “explosión de cabeza”. Por tanto, cada pregunta aporta más de un bit de información.

Si permitimos volar la cabeza de los dioses mediante contradicciones de este tipo, el problema original de Boolos se puede resolver con sólo dos preguntas. Pero esta vez tendrán que esperar un mes para conocer la solución.





Escáneres corporales

Detección de armas

Stuart F. Brown

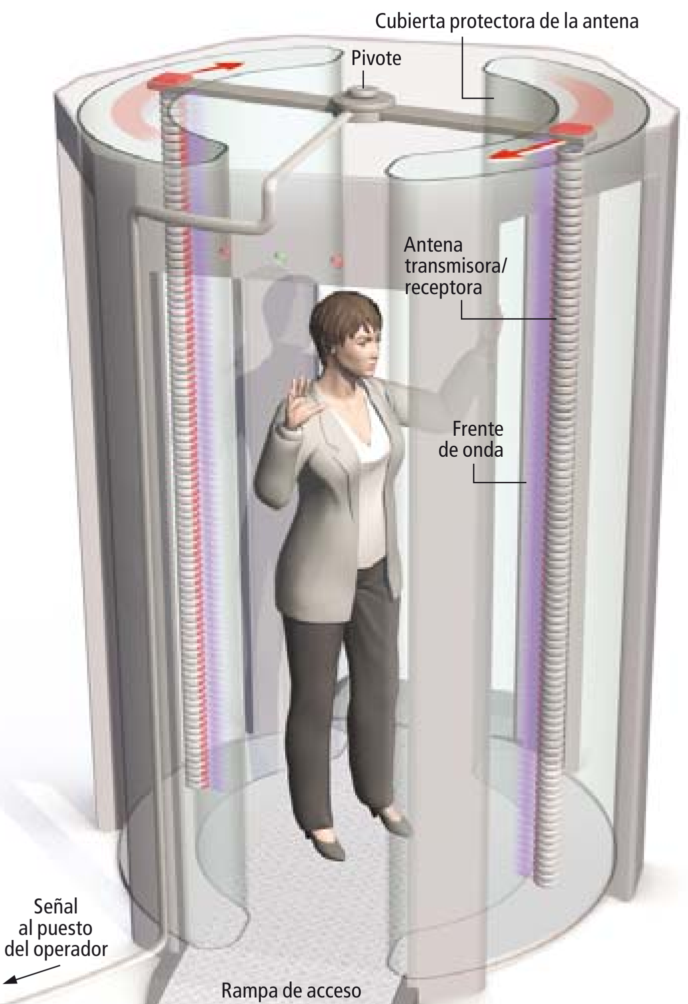
Al pasar los controles de seguridad, los pasajeros de aerolínea que respondan a ciertos criterios (haber comprado un billete de última hora, por ejemplo) no deben sorprenderse sin son sometidos a un registro corporal exhaustivo manual, un cacheo, que algunos consideran una práctica atentatoria.

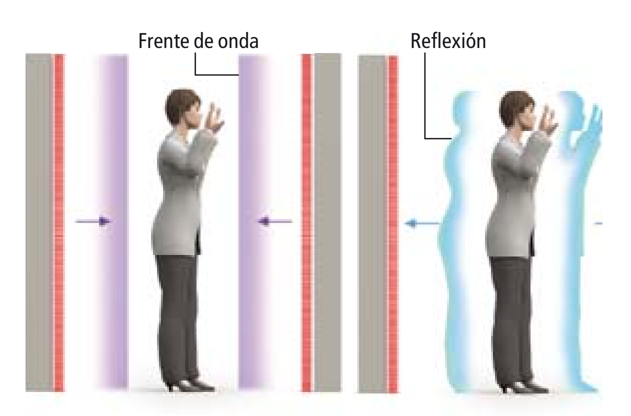
Los inspectores de la Administración de Seguridad en los Transportes (TSA, de "Transportation Security Administration") del aeropuerto Sky Harbor, en Phoenix, ofrecen ahora a esos pasajeros la posibilidad de sustituir el cacheo por un escaneo corporal. Hasta ahora, en torno al ochenta por ciento de los pasajeros seleccionados para una segunda inspección han preferido pasar por la máquina. La TSA ensaya ahora dos técnicas de escaneo corporal. El programa de pruebas no tardará en ampliarse al LAX, el aeropuerto de Los Angeles, y al JFK, de Nueva York.

Un procedimiento corresponde al registro de imágenes por retrodifusión de rayos X. Lo ha desarrollado American Science and Engineering, en Billerica (Massachusetts). Se basa en captar una radiación X de baja intensidad que se refleja en el cuerpo del pasajero y en los objetos que éste lleve ocultos. (Esa técnica difiere de la formación de imágenes por rayos X estándar, que emplea haces de energía superior.) La reflexión de cada material es proporcional a la densidad del mismo. Los elementos de número atómico bajo (carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno, ingredientes comunes de los explosivos) crean una intensa dispersión que resulta visible en las imágenes de la pantalla de los operadores y es discernible de las moléculas orgánicas del cuerpo humano.

El segundo procedimiento en ensayo corresponde al registro de imágenes por ondas milimétricas. Ese sistema, construido por L-3 Communications, de Woburn (Massachusetts), emite haces de energía de radiofrecuencia sintonizados a la reflexión óptima sobre la piel humana. La radioenergía reflejada se emplea entonces para construir un modelo tridimensional del pasajero y de todo lo que lleve consigo.

La TSA no ha comentado nada todavía sobre las prestaciones relativas de ambos sistemas, pues las pruebas siguen en curso. Pero no faltan críticos preocupados por la privacidad. Barry Steinhardt, director adjunto de la Unión Americana por las Libertades Civiles, compara el registro de imágenes por retrodifusión de rayos X con un "cacheo electrónico al desnudo". El fabricante ha modificado la programación del dispositivo para que en las imágenes se reduzcan a contornos los detalles del cuerpo de la persona y se resalten los objetos de interés (una navaja cerámica encajada bajo un calcetín, por ejemplo). El aparato de ondas milimétricas ofrece prestaciones similares. Según la TSA, los empleados que examinan las imágenes se sientan donde no pueden ver a la persona controlada; además, las imágenes se borran tras ser examinadas.





ESCANEO POR ONDAS MILIMETRICAS

El pasajero entra. Dos hileras verticales de transmisores/receptores giran en paralelo; cada uno emite un frente de onda que atraviesa la ropa y se refleja en el cuerpo de la persona y en cualquier objeto oculto. Por respeto a la intimidad, el operario que observa la imagen resultante se encuentra en un lugar apartado.

Tiempo de escaneo = 10 segundos
Frecuencia del haz = 24–30 GHz
Potencia por unidad de superficie = 6×10^{-6} mW/cm^2

ESCANEO POR RETRODIFUSION

El pasajero se coloca de pie frente a la máquina. Un colimador giratorio proyecta sobre él un haz de rayos X a través de una rendija. Al rebotar en la persona y en los objetos ocultos, el haz se dispersa hacia los detectores. Cada escaneo consta de un recorrido completo del aparato de rayos X desde el techo hasta el suelo. El pasajero se gira y el aparato sube para escanear el otro lado.

Tiempo de escaneo = 30 segundos
Frecuencia del haz = 1000–1400 GHz
Energía del haz = 1,45 keV

Imagen que ve el operador

Arma
Reloj
Explosivos
Navaja cerámica

Rayos X
Detectores
Colimador giratorio
Fuente de rayos X
Rayos X retrofundidos
Señal al puesto del operador

Imagen que ve el operador

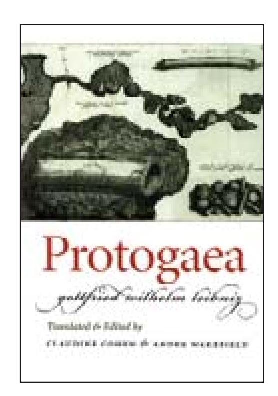


¿SABIA USTED QUE...?

OJOS INDISCRETOS: Amén del comprensible pudor sobre el hecho de que un extraño vea a través de nuestra ropa, los viajeros podrían tener otras razones para mantener oculto lo que habitualmente no está a la vista: un escáner corporal pondría de manifiesto mastectomías, aparatos de colostomía, implantes de pene y catéteres.

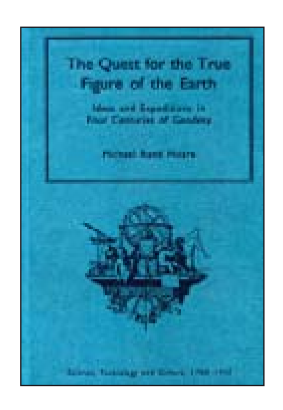
SIN RIESGOS: Los fabricantes de escáneres sostienen que la cantidad de energía a la que se somete al cuerpo no supone un riesgo para la salud de los pasajeros. L-3 Communications asegura que la energía que proyecta su equipo corresponde a una diezmilésima de la que se emite en una comunicación de teléfono celular. Según AS&S, la radiación que emite un retrodifusor de rayos X, inferior a 10 microrrems, es la misma que se recibe de fuentes naturales durante dos minutos de vuelo en avión a 9000 metros de altura.

ESCANER EN EL PROBADOR: La técnica de registro de imágenes se aplica también en el sector de la moda. Intellifit Corporation tiene un "probador virtual" en West Chester, Pennsylvania. Una máquina de ondas milimétricas escanea al cliente para determinar su forma corporal; el dependiente le muestra luego las prendas que mejor le sientan (un modelo concreto de vaqueros, por ejemplo).



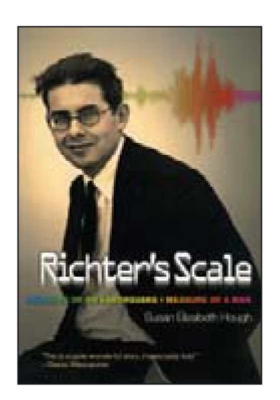
GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ. PROTOGAEA.

Edición original, traducción al inglés y comentarios por Claudine Cohen y Andre Wakefield. The University of Chicago Press; Chicago, 2008.



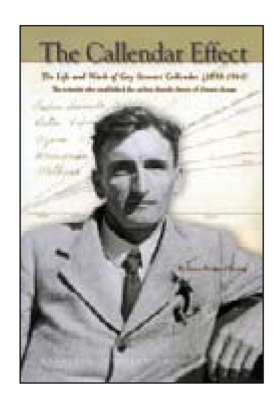
THE QUEST FOR THE TRUE FIGURE OF THE EARTH. IDEAS AND EXPEDITIONS IN FOUR CENTURIES OF GEODESY,

por Michael Rand Hoare. Ashgate; Aldershot, 2005.



RICHTER'S SCALE. MEASURE OF AN EARTHQUAKE-MEASURE OF A MAN,

por Susan Elizabeth Hough. Princeton University Press; Princeton, 2007.



THE CALLENDAR EFFECT. THE LIFE AND WORK OF GUY STEWART CALLENDAR (1898-1964), THE SCIENTIST WHO ESTABLISED THE CARBON DIOXIDE THEORY OF CLIMATE CHANGE,

por James Rodger Fleming. American Meteorological Society; Boston, 2007.

Tierra

De su naturaleza al efecto Callendar

Si el hombre se cuestionó siempre sobre la Tierra que le servía de morada, ha habido momentos de la historia en que esa inquisición cobró especial impulso. Uno de esos períodos transcurrió entre 1660 y 1720, pródigo en hipótesis, observaciones y debates sobre la constitución y evolución desde el caos o desde un acto creador.

Siguiendo los *Principia philosophiae* (1644) de René Descartes, abundaron las exposiciones fundadas en principios mecánicos. Y se buscaron pruebas empíricas para resolver problemas que abarcaban desde los orígenes de las montañas y las causas de los terremotos hasta las erupciones volcánicas y el movimiento del mar (*Gottfried Wilhelm Leibniz. Protogaea*).

Protogaea es un relato ambicioso de la génesis del planeta. Leibniz la escribió entre 1691 y 1693. Aborda allí la formación de las montañas, los volcanes y las fuentes; clasifica los minerales y demuestra la naturaleza orgánica de los fósiles. Reflejaba, en breve, el ámbito de interés contemporáneo por la geología expresado en los *Principia* cartesianos, el *Prodromus* de Nicolaus Steno, la *Telluris theoria sacra* de Thomas Burnet y *La vana speculazione disingannata dal senso* de Agostino Scilla.

En su comienzo, percibe Leibniz, la Tierra constituía una masa fundida, que se endureció conforme fue enfriándose. De esa fusión inicial surgieron los materiales vítreos (rocas y arenas, la "osamenta" terrestre). El proceso de enfriamiento produjo bolsas imponentes y rellenas de aire o agua, que, tras colapsar, generaron montañas y valles. Durante el proceso también, los "vapores acuosos" se condensaron en agua; de su combinación con sales nacieron los mares. El peso de las aguas provocó el hundimiento de partes de la corteza terrestre y facilitó las inundaciones que, tras drenar, dejaron sedimentos endurecidos. En la estela de tales eventos aparecieron terremotos, aluviones y erupciones volcánicas. Luego de esa historia violenta, la Tierra conoció una época de paz, propicia para la aparición del hombre. En sus incursiones estratigráficas, Leibniz depende de Steno, a quien leyó y probablemente conoció en 1678.

Los científicos, armados con nuevos útiles teóricos y herramientas de observación y medida, volvieron a la vieja cuestión de la figura precisa del planeta (*The Quest for the True Figure of the Earth*). En ese contexto apareció una nueva disciplina, la *geodesia*, apuntalada en el desarrollo paralelo de la exactitud cartográfica y en el cultivo de la *gravimetría*, vale decir, la medición de la fuerza de la gravedad y su sutil variación de un lugar a otro. La controversia sobre la figura de la Tierra, reflejo de dos visiones de la mecánica, trascendió a los propios personajes invocados, Descartes e Isaac Newton, y sus formulaciones antagónicas para convertirse en un asunto de honra patria.

El quicio sobre el que giraba la mecánica celeste cartesiana era la teoría de los vórtices (*tourbillons*), constituidos por una *materia sutil*, que bañaba el universo entero. (Negaba la posibilidad de un *vacuum* en la naturaleza.) La irrupción de las leyes newtonianas del movimiento y la gravitación universal minaba la teoría de los vórtices. La primera ley establecía que un cuerpo persistiría en su movimiento rectilíneo mientras no actuara una fuerza. La *cantidad de movimiento* de Newton, o nuestro momento lineal, no tenía representación en la mecánica cartesiana. El postulado de la acción a distancia, implícito en la teoría de la gravitación universal, celaba, para los cartesianos, una vuelta taimada a las fuerzas ocultas. Más. Si para los cartesianos la rotación de la Tierra exigía un vórtice propio que operaba en conflicto con el vórtice principal que mantenía a la Tierra en su órbita, para los newtonianos la Tierra

seguía una órbita elíptica de acuerdo con las leyes de Kepler y su adecuación a la ley del inverso del cuadrado.

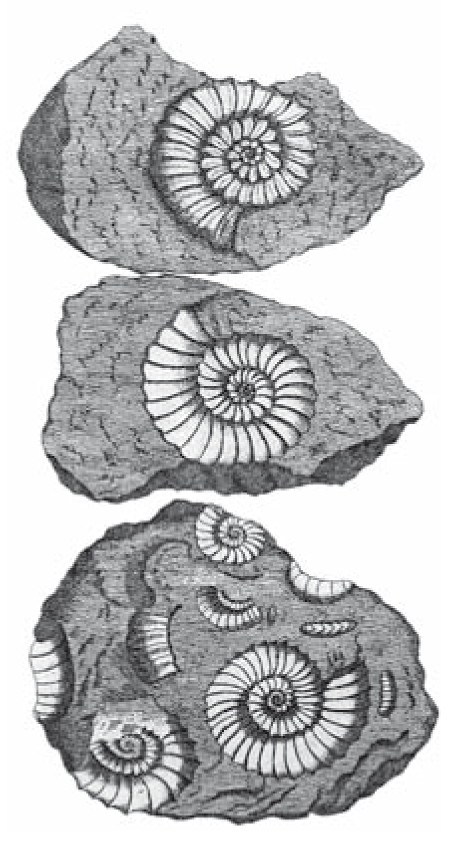
En otro orden, el cuadrante astronómico había pasado del plano vertical al horizontal y podía aplicarse para medir los ángulos subtendidos entre puntos distantes. Se sabía, además, que podía concatenarse una *serie* de triángulos y formar un polígono elongado, que cubriese el espacio entre dos hitos muy alejados y resolviera la distancia exacta entre ellos. Sobre ese proceso de *triangulación* pivotó el arte cartográfico.

Con ese telón de fondo, en los años treinta del siglo XVIII, salieron de París dos expediciones, auspiciadas por la Academia Real de Ciencias. La primera, a las órdenes de Louis Godin, se encaminaba hacia la región ecuatorial del Perú; la segunda, mandada por Pierre-Louis Moreau de Maupertuis, hacia el Círculo Artico. Se proponían determinar la forma precisa de la Tierra a través de la medición de la variación de un grado de latitud en puntos separados. La dirección de cambio en la longitud de un grado a lo largo de un meridiano constituye el criterio para distinguir entre una Tierra *oblata* o *prolata*, mientras que la magnitud del cambio revela la cuantía de distorsión con respecto a la esfera. A las expediciones les guiaba el deseo de demostrar la corrección de la predicción newtoniana de que la Tierra no era una esfera perfecta, sino que estaba aplanada en los polos. Los cálculos matemáticos de Newton avalaban la geometría de un planeta de revolución, hipótesis que quedó confirmada cuando se colacionaron los resultados de las mediciones.

Desde el comienzo, América del Sur se había presentado como la opción más idónea para una inspección ecuatorial, desechadas Africa y Borneo. Perú ofrecía altiplanos, caminos abiertos y picos montañosos y exentos de vegetación selvática. Nuestro Consejo de Indias dio su aprobación bajo la condición de la presencia de dos representantes españoles "inteligentes en matemáticas y astronomía", nombrados por el Rey. Godin había redactado un tratado sobre la geometría de la Tierra y la relación entre la forma y la variación en longitud de un grado. Le acompañaban Charles-Marie de La Condamine, hábil constructor de instrumentos y experto matemático, Pierre Bouguer, hidrógrafo, y Joseph de Jussieu, de una familia de botánicos del Jardín Real famosos.

El 16 de noviembre de 1735 arribaron a Cartagena de Indias, donde se les unieron Jorge Juan y Antonio de Ulloa, ambos recién graduados en la Academia Naval de Cádiz. En el equipo científico no podía faltar el péndulo, para medir la fuerza de la gravedad. La ecuación de semejante relación era $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$ donde T es el tiempo periódico medido de un péndulo simple, l es la longitud desde el punto de suspensión hasta el centro de gravedad y g es la aceleración de la gravedad.

El 8 de septiembre de 1735, cuatro meses después de que La Condamine y el resto se embarcaran, Maupertuis escribía a Quito: "Quizá se sorprenda de saber que se va a realizar un viaje al Norte para que no falte nada a la determinación de la figura de la Tierra." También aquí las mediciones deberían ser para el beneficio de la navegación, la seguridad en el mar y, sobre todo, "por el honor de Francia". La elección recayó en la frontera sueco-finesa, al norte del golfo de Botnia. En el viaje a Laponia participaron, además de Maupertuis, Alexis-Claude Clairaut, Réginald Outhier, Charles-Etienne-Louis Camus y Pierre-Charles Lemmonier, eximios matemáticos y, en el caso de Camus, especialista en mecánica y en relojes y hábil constructor de máquinas. Se habilitaron telescopios portátiles, cuadrantes, péndulos y brújulas, con un sector gigante. Ya en destino, sabían que una red de hitos de inspección debía abarcar una zona tan extensa como fuera posible, del orden de un grado y ordenada en paralelo al meridiano de referencia.



El proceso de petrificación, según Leibniz y Steno.

De la figura externa a sus entrañas. Nadie mejor que Susan Hough, adscrita al Servicio Geológico Estadounidense en Pasadena, para escribir la biografía de uno de los principales sismólogos del siglo XX (*Richter's Scale*). Al desarrollar la escala que lleva su nombre, Charles Richter, fallecido en 1985, definió el concepto de magnitud como medida de un terremoto. El tamaño de un seísmo puede plantearse desde enfoques diversos; el mejor mensurable, su *magnitud*, que constituye una medida de la amplitud máxima de la sacudida y que puede ponerse en correlación con la energía liberada. Con todo, la escala de Richter no resulta práctica para sacudidas muy violentas, pues tiende a saturarse en esos niveles y los grandes terremotos parecen todos iguales. Un indicador más útil es la *magnitud del momento*, calculada a partir del movimiento real de la falla, que ofrece los mismos números que la escala de Richter para temblores pequeños y distingue con mayor sutileza entre los grandes.

Charles Frances Richter nació en 1900. Tras licenciarse en física a los veinte años, preparó su doctorado con una tesis, dirigida por Paul Epstein, sobre el átomo de hidrógeno con electrones en rotación. En 1927 entró, con ánimo de provisionalidad, en el Laboratorio Sismológico de California. Los terremotos constituían un capítulo consustancial de la historia de los Estados Unidos. El primero del que pudo tener experiencia propia Richter sería el producido en 1906, que afectó a la falla de san Andrés. A raíz de ese temblor y la catástrofe asociada, se planteó la necesidad de establecer laboratorios locales de registro. Así nació en 1910 el de la Universidad de Berkeley. En 1921 la Institución Carnegie financió un laboratorio sismológico en el sur de California, bajo la dirección de Harry Wood, quien contrató a Richter. Con John Anderson, Wood ideó un sismómetro de torsión, Richter, en cambio se centró en el análisis de los datos aportados por los nuevos instrumentos.



Termómetro con resistencia de platino diseñado por H. L. Callendar.

¿Cómo medir un terremoto? Fácil de plantear, muy difícil de responder. Hasta los años treinta del siglo pasado, se habían sugerido algunos métodos para escalonar la gravedad de la sacudida dependientes de los daños producidos. Las escalas de intensidad aparecieron a finales del siglo XIX, cuando el sismólogo italiano Michele de Rossi y el suizo François Forel publicaron unas escalas similares en 1874 y 1881, respectivamente. La escala de Rossi-Forel incluía diez niveles de intensidad, que iban de la alteración inapreciable a la auténtica catástrofe. Por convención, los valores de intensidad se indicaban en números romanos. Pero no se sabía que un terremoto era un movimiento brusco de grandes extensiones de la corteza terrestre a lo largo de fallas. Hasta ese hallazgo, se suponía que procedían de explosiones subterráneas o de fuerzas eléctricas. En Pasadena, el análisis sismológico empezaba con las mediciones básicas: la amplitud de las ondas sobre el sismograma y el tiempo exacto en que llegan las ondas procedentes de una estación determinada. Cuando una falla se mueve y produce un terremoto, el proceso libera energía en todas las direcciones. Energía que toma la forma de distintos tipos de ondas. Las más céleres son las ondas P, o primarias, ondas de compresión. Las ondas S, ondas secundarias, viajan más lentas. Otras ondas más complejas son las ondas de superficie.

En 1930 se incorporó Beno Gutenberg al laboratorio, una autoridad ya entonces en sismología observacional, geofísica y meteorología. Gutenberg publicó cientos de artículos técnicos y siete libros. Sus contribuciones incluyen una determinación precisa de la profundidad del núcleo de la Tierra. Formó tándem con Richter, cuya escala contribuyó a idear y pulir. Juntos trabajaron en la estadística de la frecuencia de terremotos, la distribución Gutenberg-Richter, que describe la pauta general predictible de los tamaños. Gutenberg y Richter escribieron juntos cuatro artículos monumentales sobre la naturaleza de las ondas sísmicas. Y se empeñaron en la creación de una escala unificada de magnitud, que sirviera para determinar magnitudes de terremotos, grandes y pequeños, cercanos y lejanos.

La escala de Richter, ideal para temblores inferiores a 5 o 6, apareció en el artículo "An instrumental earthquake magnitude scale", que ocupaba las primeras 31 páginas del número de enero de 1935 del *Bulletin of the Seismological Society*. Richter se percató de que un sistema de clasificación útil debía emplear una gama manejable de valores, y que el intervalo entre el tamaño mayor y el menor era amplísimo e inmanejable. Gutenberg le sugirió entonces describir logarítmicamente las amplitudes y simplificar así los cálculos. De ese modo, y como la energía crece con la potencia 3/2 de la amplitud de la sacudida, un terremoto de magnitud 4 libera una energía treinta veces superior a la liberada por otro de magnitud 3 y un terremoto de magnitud 5 libera mil veces más energía que otro de magnitud 3. Se requería, además, considerar los terremotos producidos a distancias diferentes, múltiples, para proceder a la corrección crítica de la distancia (con el fenómeno asociado de atenuación del terremoto con la distancia). Mediante un proceso de superposición de curvas, halló una forma simple de corregir las mediciones de amplitud en función de la distancia del sismómetro al terremoto. Con una gama manejable de números y una corrección de la distancia, sólo quedaba construir una escala sensible. Pese a lo que se supone, la escala no tiene en 10 el límite superior, sino que éste se halla abierto.

Escasos años después, se daba a conocer otro fenómeno decisivo para entender el comportamiento del sistema Tierra (*The Callendar Effect*). En 1938, Guy Stewart Callendar unió los tres elementos clave del calentamiento global: elevación de la temperatura, aumento de la concentración de dióxido de carbono antropogénico y radiación de infrarrojos. Al percatarse de una tendencia ascendente significativa de las temperaturas en los cuatro primeros decenios del siglo XX y de la retirada sistemática de los glaciares, compiló mediciones de concentraciones crecientes del CO_2 atmosférico y vinculó el aumento de CO_2 con la quema de combustibles fósiles. Sintetizó la información que empezaba a disponerse sobre las bandas de absorción infrarroja de los componentes traza de la atmósfera y asoció la creciente radiación del firmamento de CO_2 extra con la tendencia ascendente de la temperatura: el efecto Callendar.

Nacido en 1898, fue uno de los ingenieros de combustión y vapor más reputados de Inglaterra, especialista en física de infrarrojos y autor del libro de referencia estándar sobre las propiedades del vapor a temperaturas y presiones muy altas. Ideó el sistema de dispersión de la niebla en los aeropuertos durante la Segunda Guerra Mundial (FIDO). Tomó unas mediciones tan precisas de las condiciones atmosféricas, que se aprovecharon para corregir los registros oficiales de Inglaterra central; recogió series de datos del tiempo en todo el mundo que evidenciaban una tendencia sin precedentes hacia el calentamiento. Para respaldar su hipótesis, calculó el consumo de combustibles fósiles en el mundo, estimó los reservorios de carbono y su absorción por océanos y biosfera. Callendar estableció el ahora número estándar de 290 partes por millón como la concentración básica de dióxido de carbono y estimó que había aumentado en un diez por ciento para 1938. Su tesis apareció en "The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Temperature" (1938). A comienzos de los años cincuenta, Callendar publicó su trabajo fundamental sobre el movimiento y dimensiones de los glaciares en respuesta a las variaciones de temperatura.

—Luis Alonso

EN EL PROXIMO NUMERO DE JULIO 2008



Génesis de los planetas,

por Douglas N. C. Lin

Los últimos datos indican que la formación de los planetas corresponde a un proceso asombrosamente caótico.

Autofagia,

por Vojo Deretic y Daniel J. Klionsky

Proteínas desgastadas, orgánulos averiados y microorganismos invasores, todos son absorbidos por diminutas "aspiradoras" celulares. Si se mantuviera operativo, ese mecanismo retrasaría el envejecimiento.

Reciclaje del combustible nuclear,

por Frank N. von Hippel

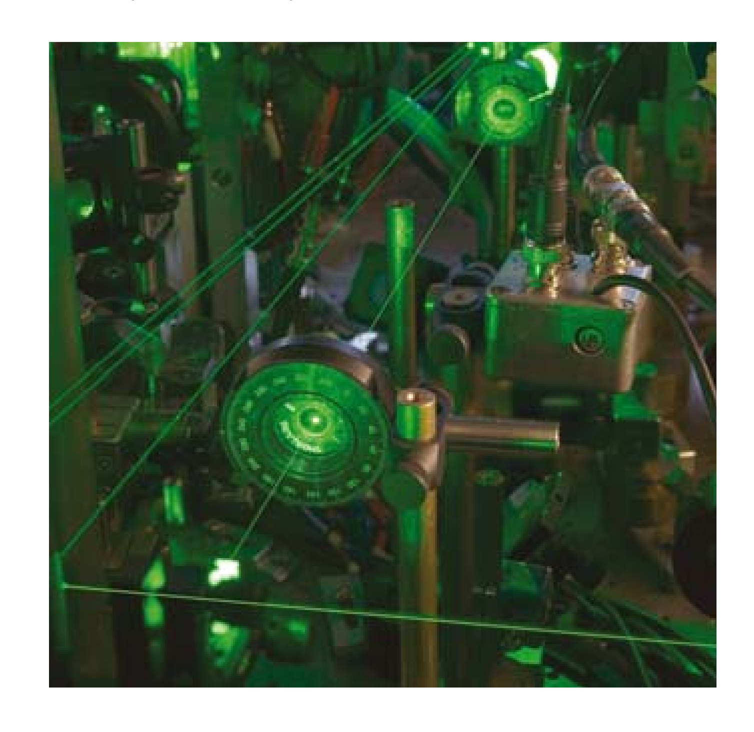
En EE.UU. están en marcha planes de reutilización del combustible de reactor agotado. Las ventajas del proyecto son nimias comparadas con sus peligros.



Trampas para átomos,

por Sonja Franke-Arnold y Aidan S. Arnold

Los fotones poseen un tipo de momento angular capaz de guiar, atrapar y rotar átomos y partículas ultrafrías.



Causalidad y epidemiología,

por Alfredo Morabia y Miquel Porta

La combinación del enfoque poblacional
con la comparación de grupos permite extraer inferencias causales cuando no pueden deducirse por otra vía.